

Санкт-Петербург
2017

АННОТАЦИЯ

Тема: «Перспективы газогидратоносности Восточно-Арктического шельфа»

Объем выпускной квалификационной работы - 47 страниц, на которых размещены 17 рисунков и 5 таблиц. При написании работы использовалось 28 источников. В содержание входит введение, 4 главы, 9 разделов, 4 подраздела, заключение.

Объектом исследования при написании работы стал процесс формирования газовых гидратов. Предметом исследования работы послужило изучение механизмов формирования газовых гидратов в пределах Восточно-Арктического шельфа России.

В данной работе рассматривается возможность формирования газовых гидратов в пределах Восточно-Арктического шельфа России и предполагаемое содержание в них метана. На основе данных о тектоническом районировании и термобарических условиях шельфа, а также о содержании метана в донных отложениях, были выделены перспективные на гидраты структуры и смоделированы их зоны стабильности в программах Hydrate prediction program и Excel, выдвинуты несколько предположений о возможности существования скоплений газовых гидратов, построена карта их предполагаемого залегания, рассчитаны перспективные площади и выход метана из гидратов. Областью применения работы может послужить добыча газа из гидратов в будущем при укреплении их в качестве потенциального углеводородного сырья и решение экологических проблем, связанных с эмиссией метана в Арктике.

Ключевые слова: газовые гидраты, Восточная Арктика, море Лаптевых, Восточно-Сибирское море, Чукотское море, шельф, формирование гидратов, ресурсы

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ФИЗИЧЕСКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ОЧЕРК	5
2. ТЕКТОНИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ	11
3. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ	14
3.1. Море Лаптевых	14
3.2. Восточно-Сибирское море	16
3.3. Чукотское море	18
3.3.1. Чукотская складчатая область	18
3.3.2. Остров Врангеля	20
3.3.3. Северная Аляска	22
3.3.4. Стратиграфические комплексы Чукотского моря	23
4. ГАЗОВЫЕ ГИДРАТЫ	26
4.1. Общие понятия	26
4.2. Методика оценки	27
4.3. Газовые гидраты моря Лаптевых	29
4.4. Газовые гидраты Восточно-Сибирского моря	31
4.5. Газовые гидраты Чукотского моря	33
4.6. Газогидратность Восточно-Арктического шельфа	38
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	43
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	45

ВВЕДЕНИЕ

Одним из приоритетных стратегических направлений нефтегазового комплекса Российской Федерации является энергетическое развитие Восточной Сибири и Дальнего Востока на суше и море и наращение углеводородных запасов за счет еще малоизученного арктического шельфа морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского. Так, на данный момент компания «Роснефть» уже владеет девятью лицензионными участками на шельфе Восточной Арктики, был выполнен большой объем геологоразведочных работ, предварительно подсчитаны извлекаемые ресурсы углеводородов, составляющие порядка 15,8 млрд. т. н. э. (по данным компании на официальном сайте). Несмотря на это, Восточная Арктика по-прежнему остается одним из наименее изученных и наиболее труднодоступных регионов России.

С другой стороны, в последнее время существует определенный мировой интерес к природным газовым гидратам благодаря открытию их крупных скоплений, главным образом под морским дном вдоль внешних континентальных окраин Мирового океана, а также в регионах Арктики. По текущим оценкам количество природного газа в газогидратах мира на несколько порядков больше, чем остающиеся извлекаемые ресурсы традиционного природного газа, так что с определенной долей уверенности можно сказать, что газовые гидраты могут рассматриваться как потенциальные ресурсы энергетического сырья и в будущем стать важным объектом поиска, разведки и добычи. Помимо перспектив в топливном плане, интерес вызывает роль газовых гидратов в парниковом эффекте, как возможный источник поступления метана в атмосферу. Также стоит учитывать их осложняющий фактор при освоении морских природных ресурсов.

Цель выпускной квалификационной работы – изучение потенциальных скоплений газовых гидратов на шельфе Восточной Арктики.

Задачи:

- а) Изучить общее геологическое строение морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского;
- б) Дать представление о газовых гидратах;
- в) Определить, являются ли термобарические условия шельфа Восточной Арктики подходящими для формирования газовых гидратов;
- г) Оценить площадь зоны стабильности газовых гидратов, возможный объем газовых гидратов и объем содержащегося в них газа.

1 ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Исследуемая акватория – шельф Восточной Арктики, а именно шельф окраинных морей Северного Ледовитого океана: Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского (рис.1). Все они располагаются за полярным кругом, между собой ограничены условными линиями, северная граница пролегать чуть дальше континентальной окраины, а южная – побережье материка. Их суммарная площадь порядка 2,2 млн. км², причем шельфовая часть занимает порядка 80%, т.е. около 1,7 млн. км².



Рисунок 1. Физико-географическая карта России (<https://geographyofrussia.com>)

Красным обозначены границы исследуемой акватории.

С запада на восток первое море из рассматриваемых – Лаптевых. Западная граница моря Лаптевых проходит по восточной окраине архипелага Северная Земля и проливу Вилинецкого, восточная – по Новосибирским островам и проливу Дмитрия Лаптева, на юге ограничивается материком от мыс Святой Нос до Хатаганского залива, на севере – материковой отмелью, захватывая небольшую часть ложи океана. Площадь моря Лаптевых составляет 662 тыс. км², средняя глубина – 533 м (рис. 2).

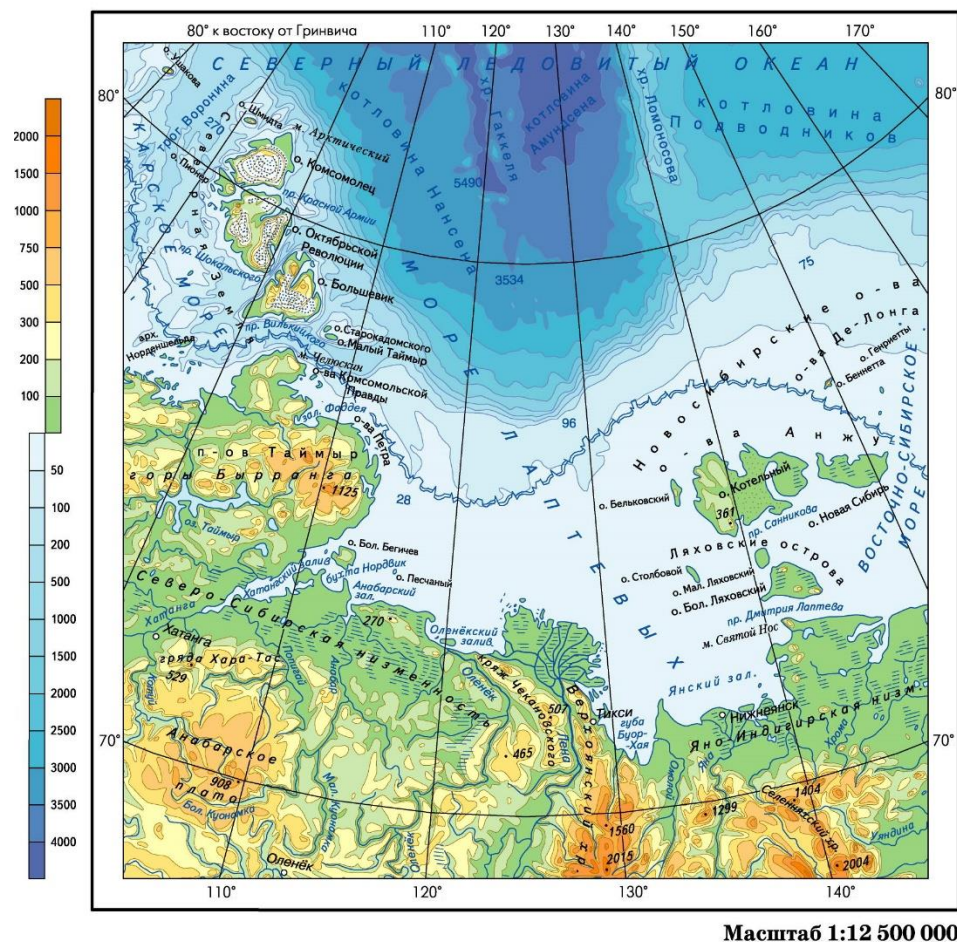


Рисунок 2. Физико-географическая карта моря Лаптевых (<https://geographyofrussia.com>)

В море Лаптевых насчитывается несколько десятков островов. Большинство из них находится в западной части, располагаясь группами или в одиночку. Крупнейшие группы островов: Комсомольской Правды, Вилькицкого и Фаддея, одиночные: Старокадомского, Малый Таймыр, Большой Бегичев, Столбовой, Песчаный. Береговая линия довольно сильно изрезана, присутствуют заливы (Хатаганский, Анабарский, Оленекский, Янский) губы (Буор-Хая, Ванькина), бухты (Кожевникова, Нордвик, Тикси), полуострова (Хара-Тумус, Нордвик). Береговой ландшафт довольно разнообразен, в основном низменный, но местами выходят невысокие горы. В море Лаптевых впадает крупная река Лена, а также Хатанга, Анабар, Оленек и Яна. Рельеф дна представляет собой равнину, круто обрывающуюся к северу, переходя в глубоководную котловину Нансена, но большая часть моря мелководна. Рассечен он слабо, выделяются несколько малых желобов. Дно покрыто песком и илом.

Среди арктических морей море Лаптевых наиболее удалено от Атлантического и Тихого океанов, поэтому испытывает наименьшее воздействие теплых водных потоков и является одним самых суровых в плане климата. Средняя температура в январе колеблется от -31 до -34 °С, минимальная – -50 °С. Летом порядка 0-5 °С, максимальная – 32 °С. Зимой

обычны сильные ветра и метели, а снег выпадает даже летом, но при более слабом ветре. Море скрыто подо льдом практически весь год, образующийся припай углубляется на сотни километров от берега, при мощности 2 м. и более, но формируются и довольно далеко простирающиеся поyny. На севере наблюдаются плавучие льды и айсберги. Температура воды подо льдом составляет от -0,8 до -1,8 °C зимой, летом остается близкой к 0 °C, но может прогреваться до 10 °C в заливах. Вертикальное распределение температуры хорошо заметно только летом на значительной глубине. Соленость моря зимой меняется от 20-25 ‰ на юге до 34 ‰ на севере, летом от 5-10 до 30-32 ‰. Сильное влияние у берегов оказывает таяние льдов и крупный речной сток (Добровольский, 1982).

Порты – Тикси – один из самых северных населенных пунктов России, Нижнеянк.

Восточно-Сибирское море граничит на западе с морем Лаптевых по Новосибирским островам и проливу Дмитрия Лаптева, а на востоке с Чукотским по меридиану 180° через остров Врангеля и далее по проливу Лонга. Северная граница по материковой отмели, южная – от мыса Якан до мыса Святой Нос. Площадь Восточно-Сибирского моря составляет 944 км², средняя глубина – 54 м (рис.3).

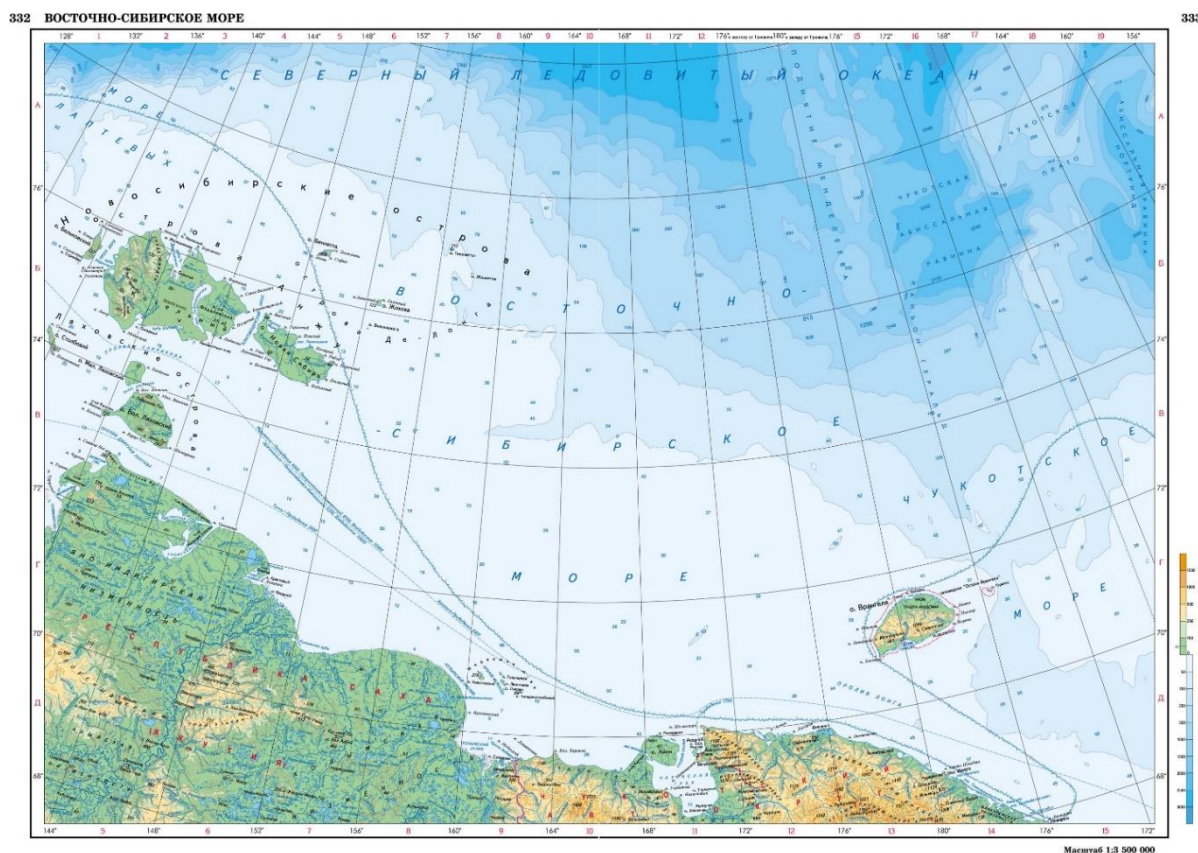


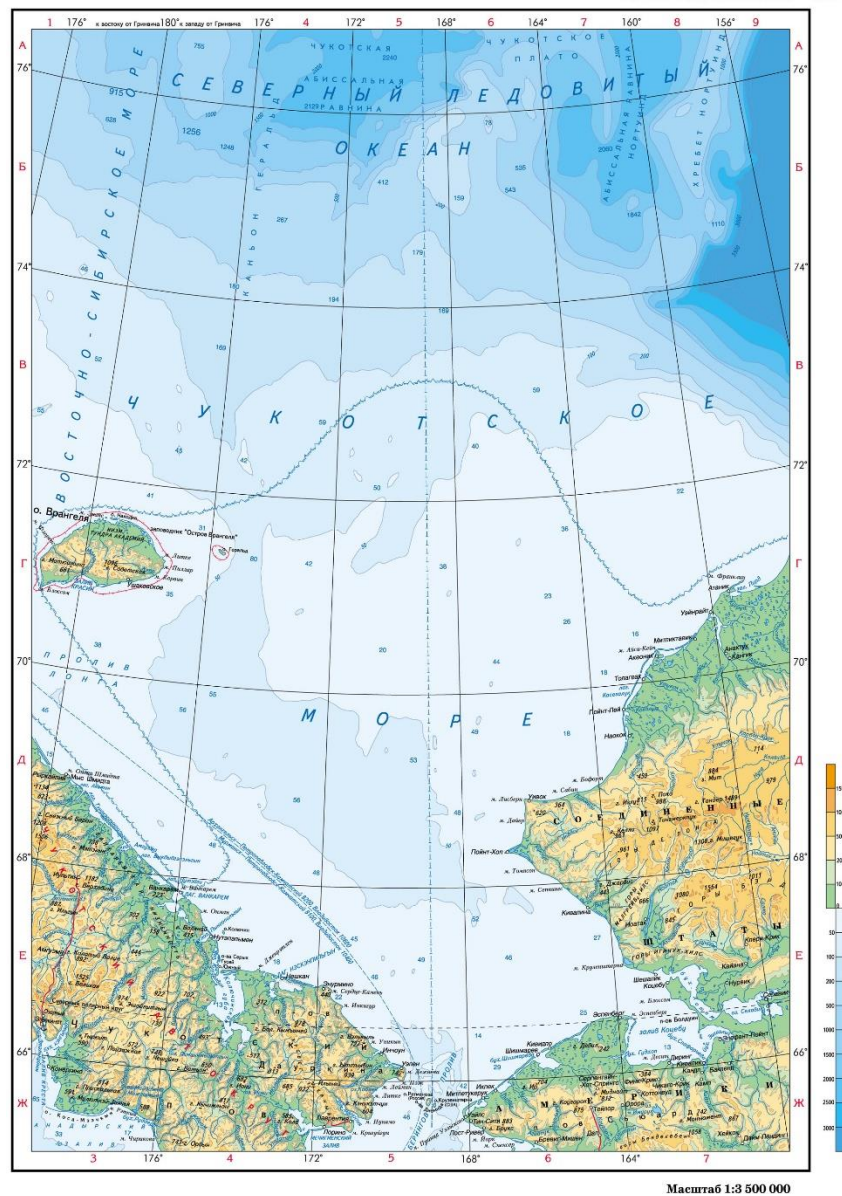
Рисунок 3. Физико-географическая карта Восточно-Сибирского моря
(<https://geographyofrussia.com>)

Островов в море практически нет, кроме сконцентрированных на западе моря архипелагов. Крупнейшие острова: Новосибирские, Ляховские, Де-Лонга. Береговая линия образует крупные изгибы, либо уходящие в сушу, либо выступающие в море, заливы (Колымский) и губы (Чаунская, Омуляхская, Хромская, Колымская), но местами линия ровная. Характер прибрежного рельефа значительно разнится для западной и восточной части моря. На западе берега пологи и низменны, на востоке же преобладают невысокие крутые берега, местами скальные обрывы. В Восточно-Сибирское море впадают реки Индигирка и Колыма. Рельеф дна моря ровный, без крупных впадин и возвышенностей, не считая континентальной окраины, к северо-востоку от устьев рек расположены относительно глубокие желоба. Является наиболее мелководным из восточно-арктических морей. Донные отложения составляют песчаные, илисто-песчаные и илистые отложения.

Среднемесячная температура воздуха в январе около -30°C , характерна ясная погода при умеренном ветре с континента. Летняя температура невысока, от 0 до 3°C при сильном северном ветре. Погода преимущественно пасмурная с дождями или мокрым снегом. Как и море Лаптевых, Восточно-Сибирское море почти весь год покрыто ледяной коркой при широком припае, толщиной около 2 м., местами многолетние плавучие льды могут сохраняться и летом, дрейфуя посредством ветров. На свободной ото льда воде наблюдаются достаточно высокие волны до 5 м. при штормовых ветрах. Температура воды на поверхности меняется от $-0,2$ до $-1,8^{\circ}\text{C}$ с юга на север зимой, а летом от 0 до 8°C соответственно. Изменение температуры с глубиной незначительно. Соленость моря растет с юго-запада на северо-восток. Зимой она равна от $4-5\%$ у устья рек до $31-32\%$ на севере, летом с таянием льдов и притоков речных вод уменьшается до $24-26\%$. Помимо этого, соленость увеличивается с глубиной в зависимости от ледовой обстановки (Добровольский, 1982).

Крупнейший и главный порт Восточно-Сибирского моря – Певек, являющийся самым северным городом России, также бухта Амбарчик.

За Восточно-Сибирским морем между Чукоткой и Аляской располагается Чукотское море, ограничивающееся на западе проливом Лонга, на востоке – морем Бофорта и побережьем п-ова Аляска, на юге – северо-восточным побережьем Чукотского п-ова и Беринговым проливом. Площадь Чукотского моря составляет $589,6$ тыс. км^2 , средняя глубина 77 м (рис.4).



Масштаб 1:3 500 000

Рисунок 4. Физико-географическая карта Чукотского моря (<https://geographyofrussia.com>)

На границе Восточно-Чукотского и Чукотского морей расположен остров Врангеля, отделенный от берега проливом Лонга. Представляет собой гранитогнейсовым останец. Вместе они составляют самый северный государственный заповедник России. Современный рельеф островов сильно расчленен, побережье большую часть года, за исключением последних месяцев лета, скованно льдом и окружены нагромождениями торосов. У Колючинской губы расположен остров Колючин – горный останец, площадью 8 км². Береговая линия слабо изрезана. От мыса Шмидта до мыса Ванкарем тянется типично лагунный берег, от которого отходят галечно-песчаные косы, отделяющие от моря обширные мелководные лагуны. Далее до Колючинской губы берег скалистый и обрывистый и только в районе лагун он низкий. Колючинская губа – единственный крупный и глубоководный залив российского побережья Чукотского моря. От Колючинской губы до

мыса Дежнева, крайней восточной точкой Евразии, берег скалистый, обрывистый. В наиболее узкой части Берингова пролива расположены высокие и скалистые острова Диомида – а именно остров Ратманова (Россия) и остров Крузенштерна (США). В Чукотское море впадают небольшие реки Амгуэма, Ванкарем. Подводный рельеф шельфа пересекают каньон Геральда, глубиной до 90 м и каньон Барроу, глубиной до 160 м. Дно моря покрыто рыхлым илом с песком и гравием.

Данный район характеризуется суровым климатом. В Чукотском море средняя суточная температура воздуха в январе колеблется от -20 до -30° , минимальная – -47° . Летняя температура от 1 до 7° , максимальная – 18° . Среднегодовое количество осадков 200-250 мм на севере и до 400 мм на юге. Летом над морем царит пасмурная погода с редким дождем, иногда мокрым снегом. Осенью штормовые ветра способствуют появлению волн высотой до 7 м, часто образуя торосы высотой до 6 м. Чукотское море, несмотря на более южное положение по сравнению с другими арктическими морями, большую часть года покрыто льдами. Формирование ледяной корки происходит неравномерно. Максимальная ширина припая отмечается в районе Колючинской губы, его кромка проходит примерно вдоль изобаты 20 м и достигает 20-27 км. Наименьшая ширина припая менее 2 км наблюдается южных районах. Температура воды на поверхности зимой равна $-1,8^{\circ}$, летом – от 4 до 12° . Зимой характерна повышенная солёность (около 31-33 ‰) подлёдного слоя воды. В летний период солёность меньше, увеличивается с запада на восток от 28 до 32 ‰. С глубиной обычно увеличивается из-за воздействия талой воды. Минимальна она у устьев рек – до 5 ‰ (Добровольский, 1982).

Крупнейшие порты Чукотского моря – Уэлен, самое восточное поселение России, и Барроу, самый северный город США.

2 ТЕКТНИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ

Структура Восточно-Арктического шельфа России представляет собой сочетание крупных осадочных бассейнов и поднятий, из которых можно выделить Лаптевский рифтогенный бассейн, Новосибирскую систему грабенов и горстов, поднятие Де-Лонга, Чукотско-Восточно-Сибирский бассейн, а также систему периокеанических структур на границе континентального склона (рис.5).

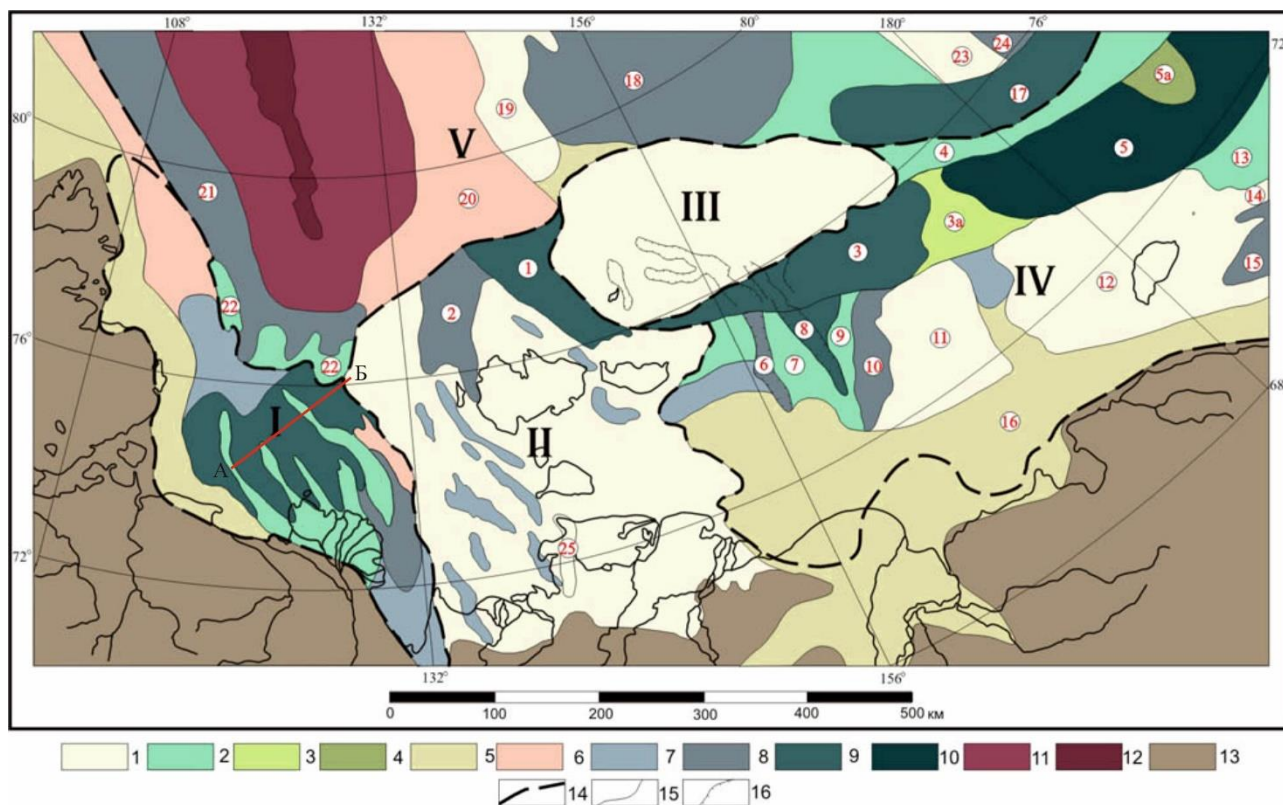


Рисунок 5. Основные структуры Восточно-Арктического шельфа (Виноградов, 2004)

1-4 поднятия с чехлом: 1 - < 1-3 км; 2 - < 6-7 км; 3 - 8-9 км; 4 - 16-17 км; 5-6 моноклинали и ступени с чехлом: 5 - < 1-3 км; 6 - < 4-5 км; 7-10 грабены и прогибы с чехлом: 7 - < 3-5 км; 8 - < 5-7 км; 9 - < 9-12 км; 10 - < 20 км; 11 - котловины Нансена и Амундсена; 12 - хребет Гаккеля; 13 - комплекс материковых структур, обрамляющих шельф; 14-16 границы: 14 - главнейших структур; 15 - крупных структур; 16 - грабенов и горстов.

Названия структур: I - Лаптевский рифтогенный бассейн; II - Новосибирская система грабенов и горстов: 1 - Новосибирский прогиб, 2 - Анисинский прогиб; III - поднятие Де-Лонга; IV - Чукотско-Восточно-Сибирский бассейн: 3 - Жоховский прогиб, 3а - Жанетское поперечное поднятие, 4 - Северо-Чукотское поднятие, 5 - Северо-Чукотский прогиб, 5а - Андриановское поперечное поднятие, 6-10 - Восточно-Сибирская рифтогенная впадина (6 - Южно-Денбарский прогиб, Чукочинское поднятие, 8 - Мельвинский грабен, 9 - Восточно-

Черское поднятие, 10 – Амбарчикский прогиб), 11 – Барановское поднятие, 12 – Врангелевское поднятие, 13 – вал Барроу, 14 – дуга Геральда, 15 – Южно-Чукотский прогиб, 16 – Прибрежная моноклиналь; V – система периокеанических структур: 17 – прогиб Вельницкого, 18 – котловина Подводников, 19 – южный фланг хребта Ломоносова, 20 – Северо-Лаптевская структурная ступень, 21 – Северо-Лаптевский прогиб, 22 – Лаптевское окраинно-шельфовые и склоновые поднятия, 23 – поднятие Менделеева, 24 – Чукотская котловина, 25 – Чочхуро-Чекурдахский ряд гранитоидных интрузий.

Красной линией обозначен профиль 01 BGR.

Лаптевский рифтогенный бассейн занимает большую часть моря Лаптевых, за исключением восточной акватории. В центральной и северной частях его ширина достигает 400 км, а северо-западе и юго-востоке не превышает 100 км. Ограничен на севере континентальным склоном, на юге и западе структурами мезозойской складчатости, а на востоке сбросом Лазарева, за которым следует Новосибирская система грабенов и горстов. В пределах бассейна выделяются многочисленные рифтогенные грабены и горсты, осложненные и разделяющиеся сбросами. Мощность осадочного чехла достаточно изменчива и может достигать 9-12 км.

Новосибирская система грабенов и горстов расположена между морем Лаптевых и Восточно-Сибирским морем, простираясь от материка до кромки шельфа, при этом сужаясь с 600 до 400 км соответственно. В общем плане представляет собой поднятие с маломощным осадочным чехлом, местами прерывистым, за исключением Анисинского и Новосибирского прогибов, где разрез мощный и непрерывный, до 12 км. Западный склон Новосибирской системы достаточно контрастен и включает в себя большое количество мелких грабенов и горстов. В отличие от него, восточный склон достаточно пологий и слабонарушенный. Вдоль осевой зоны на поверхность выступает складчатое основание.

Восточнее Новосибирского прогиба в пределах северной и северо-западной части шельфа Восточно-Сибирского моря находится поднятие Де-Лонга, подпираемое с юга Жоховским прогибом. Структура отличается округлой вытянутой с запада на восток на 800 км формой, сокращаясь с 400 до 150 км поперек. Поднятие рассечено серией сбросов. Мощность мел-кайнозойского осадочного чехла не достигает и 1 км, периодически нарушаясь выступами, предположительно, каледонского или докембрийского фундамента, хотя на склонах поднятия мощность доходит до 3-4 км.

Крупнейшей структурой Восточно-Арктического шельфа можно назвать Чукотско-Восточно-Сибирский бассейн, занимающий большую часть Восточно-Сибирского и Чукотского морей, протяженный в широтном направлении на 1300 км и расширяющийся от

450 до 900 км в сторону Аляски. На юге ограничивается горно-складчатыми мезозойскими структурами, на востоке прилегает к валу Барроу и дуге Геральда. Бассейн можно разделить на северную и южную части с, предпологаемо, каледонским и позднемезозойским фундаментами. На севере выделяются Жоховский и Северо-Чукотский прогибы, разграничивающиеся Жаннетским поперечным поднятием. Оба прослеживаются на 600 км с шириной по меридианному направлению около 200 км, но Северо-Чукотский прогиб отличается мощнейшим разрезом верхнепалеозойского-кайнозойского осадочного чехла – предположительно до 20 км, в то время, как Жоховский – только до 12 км. Часть последнего вместе с близлежащими прогибами также именуется в разных источниках Восточно-Сибирским прогибом. В южной части можно отметить Южно-Чукотский прогиб с мощностью мелового-кайнозойского чехла до 7 км и остров Врангеля – крупный выступ складчатого основания.

К системе периокеанических структур относят область сочленения шельфовых и океанических структур у континентального склона и далее вглубь океана. Периокеанические прогибы очерчивают границы глубоководных котловин Нансена и Амундсена Евразийского бассейна и котловин Подводников и Канадской Американо-Азиатского бассейна.

3 ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

3.1 Море Лаптевых

Осадочный чехол на шельфе моря Лаптевых, по данным плотностного моделирования, залегает непосредственно на мезозойском складчатом фундаменте, не имея в разрезе отложений дорифтового комплекса (Пискарев, 2002). С этим несогласием соотносится отражающий горизонт LS1, являющийся поверхностью акустического фундамента и датирующийся между ранним и поздним палеоценом. Практически повсеместно, за исключением наиболее приподнятых частей горстов на востоке моря, прослеживается следующий опорный горизонт LS2, являющийся кровлей высокоотражающей толщи и соответствующий границе эоцена и олигоцена. Горизонт LS3 фиксирует смену сейсмозаписи с субпараллельно слоистой внизу на акустически прозрачную выше и отмечает несогласие с резким изменением в седиментации, вызванное регрессией и резким похолоданием на границу миоцена и плиоцена (рис.6) (Андиева, 2008).

Нижний сейсмокомплекс между горизонтами LS1 и LS2 является наиболее мощным в разрезе – средняя мощность в Усть-Оленекском и Усть-Ленском грабенах составляет 6,5 и 5 км, а максимальная 10,5 и 10 км соответственно. Средний сейсмокомплекс между горизонтами LS2 и LS3 достигает наибольшей мощности 2,5-3 км в тех же структурах. Средняя мощность верхнего сейсмокомплекса над горизонтом LS3 порядка 1,5 км, а максимальная – 2,5 км (рис.7).

Бурение первой глубокой скважины в море Лаптевых началось только в апреле 2017 года, так что в связи с отсутствием данных вещественный состав осадочных комплексов можно только предполагать. Для нижнего и верхнего сейсмокомплексов прогнозируется преимущественно глинистый состав, а для среднего – песчаный, основываясь на особенностях сейсмозаписи и сопоставлении их с трансгрессивно-регрессивными циклами в Арктике (Андиева, 2008).

Стратиграфическая шкала			Положение отражающих горизонтов	
KZ	Q		1,8-2,4 км/с	
		N	N ₂	LS 3
			N _i	2,6-4,4 км/с
	P	P ₃	LS 2	
		P ₂	4,9-5,2 км/с	
		P ₁	LS 1	
MZ			Акустический фундамент	
PZ				
PR				

Рисунок 6. Привязка сейсмических отражающих горизонтов, выделенных по работам МОВ ОГТ в разрезе шельфа моря Лаптевых по данным МАГЭ 2005 года (Андиева, 2008)

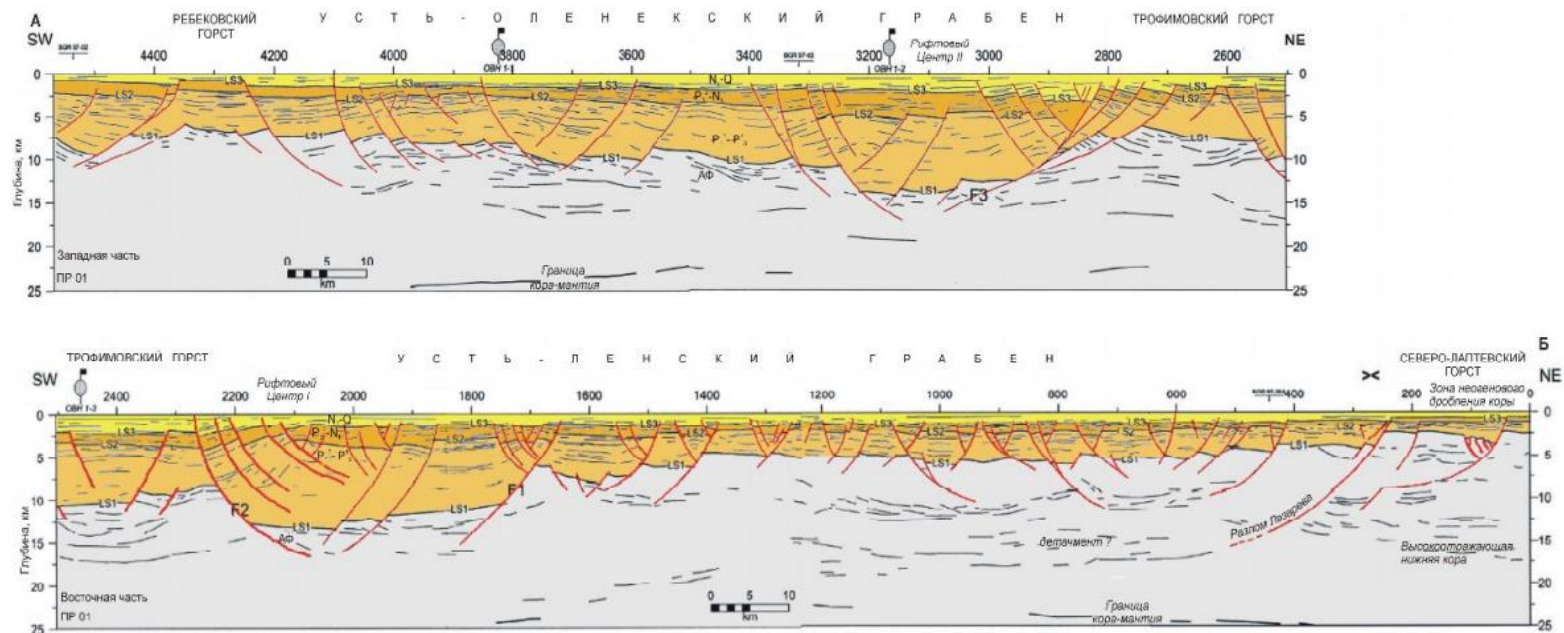


Рисунок 7. Сейсмогеологический разрез по линии А-В (профиль 01 ВГР) (Андиева, 2008)
F1, F2, F3 – сбросы на границах рифтовых центров I и II, ОВН 1-1, ОВН 1-2, ОВН 1-3 – пункты измерения скоростей. Положение разреза показано на рисунке 5.

3.2 Восточно-Сибирское море

В отличие от моря Лаптевых в Восточно-Сибирском море обширные геологоразведочные исследования проводятся совсем недавно – в течение последних трех лет. Но можно выдвинуть определенные положения, основываясь на более старых данных, полученных по профилю ЛАРГЕ 89001 в 1989 году, отработанному в западной части шельфа моря.

Предполагается, что территория делится на две области с различным возрастом складчатого основания и осадочного чехла: область каледонской складчатости на севере и позднемезозойской – на юге, а граница прослеживается по условной линии от острова Вилькицкого на западе до острова Врангеля на востоке (Виноградов, 2004).

Позднемезозойское основание и возраст вышележащих комплексов установлены на Новосибирских островах. В картировочных скважинах на острове Новая Сибирь вскрыто складчатое основание, а на острове Котельный нижняя часть осадочного чехла отмечена породами апт-альбского возраста, мощностью порядка 500 м. Подошва На островах Земля Бунге, Фадеевском и Новая Сибирь вскрыты с явными несогласиями верхнемеловые и кайнозойские терригенные отложения с преобладанием глинистых пород. Верхний мел показан бунговской и деревянногорской угленосными свитами общей мощностью около 300 м, а в кайнозойском разрезе, мощностью более 400 м, чередуются континентальные и прибрежно-морские пачки (Виноградов, 2004).

На шельфе по сейсмическому горизонту В-I прослеживается подошва апт-альбского комплекса, лежащий на позднемезозойском основании, но в направлении поднятия Де-Лонга под ним выделяются еще два горизонта А и Б, постепенно выклинивающиеся. Горизонт Б маркирует акустический фундамент каледонского возраста. Вышележащая толща является, предположительно, позднепалеозойско-триасового возраста, а между горизонтами А и В-I – юрско-раннемелового (рис.8). Отражающий горизонт В-II маркирует кровлю апт-альба, выше которой несогласно лежат породы сеноман-туронского возраста. Горизонт В-III соотносится с, предположительно, подошвой позднемеловых отложений, а В-IV – с комплексом кайнозойских отложений.

Каледониды выступают на острове Генриетты в виде вулканогенно-терригенных отложений, осложненных силлами, дайками и базальтовыми покровами. На островах Де-Лонга развиты покровы щелочных базальтов от апт-альба до неоплейстоцена мощностью пару сотен метров (Виноградов, 2004).

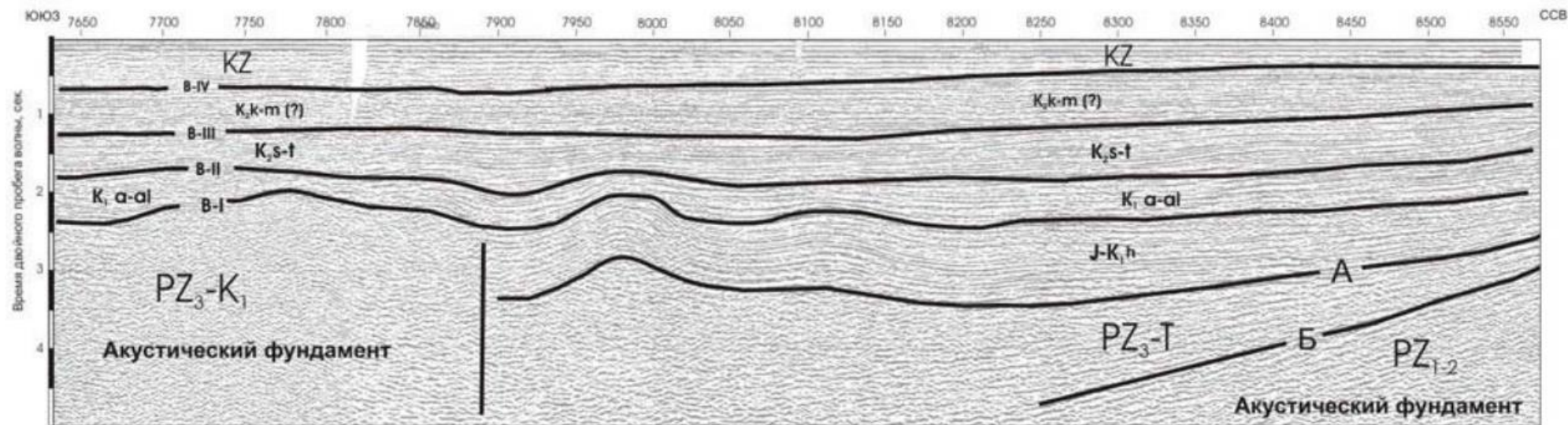


Рисунок 8. Фрагмент профиля ЛАРГЕ 89001. Взаимоотношение эпипозднемезозойской (слева от разлома) и эпикаледонской (справа от разлома) областей шельфа Восточно-Сибирского моря (Виноградов, 2004)

3.3 Чукотское море

3.3.1 Чукотская складчатая область

Стратиграфия Чукотки приводится в основном для восточной части Чукотской складчатой области, включающей Чаунскую складчатую зону, Восточно-Чукотский массив и Ванкаремскую впадину (Дальморнефтегеофизика, 2002).

Протерозой (PR)

К верхнему протерозою отнесены метаморфические толщи, обнажавшиеся на поднятиях Восточно-Чукотского массива. Они представлены биотитовыми, пироксено-биотитовыми и роговообманковыми гнейсами, а также гранатово-биотитовыми и амфиболовыми сланцами с прослоями мраморизованных известняков. Мощность до 5000 м.

Ордовик (O)

Отложения ордовика выделены в пределах Восточно-Чукотского массива. Представлены они преимущественно органогенными и пелитоморфными известняками, пепельно-серыми доломитами и желтыми плитчатыми перекристаллизованными мергелями. Отложения содержат многочисленные остатки табулят, брахиопод, трилобитов. Мощность не более 900 м.

Силур (S)

Силурийские отложения, так же, как и более древние достоверно установлены только в пределах Восточно-Чукотского массива. Залегают предположительно согласно на ордовикских. Отложения представлены зеленовато-серым и черными известково-глинистыми сланцами с граптолитами. Граптолитовые слои перекрываются массивными доломитами и доломитовыми известняками. Мощность 415 м.

Девон (D)

Отложения девонского возраста встречаются как на Восточно-Чукотском массиве, так и в Чукотской складчатой зоне. Они характеризуются последовательным залеганием толщ: песчано-сланцевой, алевролита-сланцевой и известково-сланцевой с кораллами, песчано-алевролитовой с фораминиферами. Их суммарная мощность около 2000 м.

Карбон (C)

Нижне-карбоновые отложения с размывом лежат на девонских. Они представлены чередованием известняков, песчаников, алевролитов, глинистых сланцев. В основании отмечается конгломеративный слой. Мощность 1200-1650 м.

Пермь (P)

Пермские отложения встречаются на ограниченных площадях только в Чаунской складчатой зоне. В составе их преобладают глинистые и углисто-глинистые сланцы, алевролиты, песчаники. Мощность около 1700 м.

Триас (Т)

Отложения триаса распространены в Чукотской складчатой зоне, но полностью отсутствуют в Восточно-Чукотском массиве. Они представлены алевролитами, песчаниками, глинистыми, углисто-глинистыми или глинисто-кремнистыми сланцами. Доля песчаников уменьшается вверх по разрезу. Мощность 3000-3600 м.

Юра (J)

На территории Чаунской складчатой зоны известны только верхнеюрские отложения, слагающие небольшие участки на размытой поверхности верхнетриасовых пород. Они представлены переслаивающимися аргиллитами, углистыми аргиллитами, алевролитами мелко и среднезернистыми вулканомиктовыми песчаниками. В основании залегает пачка конгломератов. Мощность 300-500 м.

Мел (K)

Образования мелового возраста представлены, в основном вулканогенными породами различного состава, слагающая северное окончание Чукотской вулканической зоны Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. Ограниченное распространение имеют терригенные угленосные породы ольховской свиты раннего мела. Свита сложена аргиллитами, углистыми аргиллитами, алевролитами, песчаниками, туфопесчаниками, туфаконгломератами с линзами каменного угля мощностью до 5 м. Мощность свиты около 180 м. Вулканогенные породы представлены андезитами, андезидацитами, туфами среднего состава, риолитами. На участке, где меловые породы перекрывают триасовые отложения, встречаются туфопесчаники и туфоконгломераты. Общая мощность до 2750 м.

Палеоген-неоген (P-N)

Палеоген-неогеновые отложения распространены на ограниченной территории приморских впадин и в долинах крупных рек. Наиболее древние образования кайнозоя представлены палеогеновой корой выветривания, развитой на нижне-карбоновых или на триасовых породах. Обычно она представлена глинисто-щебнистым материалом охристо-желтого цвета, мощностью 3-30 м. Кроме кор выветривания распространены палеоген-неогеновые терригенно-осадочные отложения прибрежно-морского и аллювиального генезиса. В составе преобладают горизонтально-слоистые суглинки, переслаивающиеся с песками, глинами, лигнитами и отдельными слоями галечников.

Четвертичный период (Q)

Четвертичная система представлена морскими, ледниковыми и аллювиальными отложениями. Они представлены пляжевыми галечниками, суглинками, горизонтально-слоистыми песками, линзами торфа и илов. Общая мощность кайнозойских отложений не превышает первых сотен метров.

3.3.2 Остров Врангеля

Несмотря на то, что остров Врангеля находится непосредственно в Чукотском море, знание его геологического строения не дает возможности в полной мере проводить аналогию при изучении шельфа. Причина заключается в том, что юрские и меловые образования на острове отсутствуют. В стратиграфическом расчленении отложений о. Врангеля существует много вопросов, обусловленных сложным геологическим строением (Дальморнефтегеофизика, 2002).

Протерозой (PR)

Верхнепротерозойские отложения известны под названием врангелевского комплекса, представленного более чем 2000 м. интенсивно складчатых и нарушенных разломами пород различного состава. В разрезе присутствуют вулканогенные (от кислых до средних) и вулканокластические породы, переслаивающиеся сланцы: амфиболитовые, биотит-амфиболовые, актинолит хлоритовые, альбит-актинолит-хлоритовые, кварцево-альбито-серицитовые, метапесчаники, метатупопесчаники аркозовые, рассланцованные конгломераты с отложениями гранита и кварца. По собранному комплексу акритарх, микрофитолитов и водорослей возраст метаморфического комплекса определяется как венд-ранний кембрий.

Силур (S)

Силурийские отложения изучены на крайнем северо-западе острова и объединены в дремхедскую свиту. Отложения дремхедской свиты со значительным перерывом с конгломератами в основании залегают на кембрийских метаморфических породах. Она сложена аргиллитами, алевролитами и кварцевыми песчаниками. Возраст определяется по многочисленным остаткам брахиопод, остракод, мшанок, кораллов. Мощность отложений около 700 м.

Девон (D)

Нижне-верхнедевонские отложения представлены, главным образом, песчаниками, известковыми песчаниками с прослоями конгломератов и гравелитов, кварцитовидными песчаниками с линзами и прослоями гравелитов мелкопесчаных конгломератов и глинистых сланцев, алевролитами, детритовыми и дополнительными известняками, доломитами. Возраст определяется по стратиграфическому положению в разрезе позднесилурийских

отложений, и по присутствию брахиопод среднедевонского возраста. Общая мощность от 800 до 2500 м, в среднем 1200 м.

Карбон (С)

Нерасчлененные карбоновые отложения представлены двумя существенно отличающимися фациальными толщами: карбонатной и карбонатно-песчаной. Первая представлена нижнекарбовыми отложениями, трансгрессивно перекрывающими верхнедевонские образования. В основании залегают маломощные линзы конгломератов, сменяющиеся переслаивающимися известняками, доломитами, гипсами, прослоями песчаников и глинистых сланцев. Реликты органогенной структуры известняков, массивное строение встречающихся куполовидных тел предполагают их рифтогенную природу. Мощность от 800 до 1500 м. Возраст определяется присутствием визейских кораллов и брахиопод. Вторая толща является переслаиванием глинистых сланцев, алевролитов, песчаников, известняков тонкорасланцованных, пелитоморфных и массивных с прослоями криноидных известняков и доломитов, органогенно-детритовых, криноидных с прослоями глинистых. В составе толщи определены фораминиферы, кораллы, брахиоподы. Мощность от 800 до 1200 м.

Пермь (Р)

Пермские породы трансгрессивно перекрывают различные горизонты карбона. Они делятся на три толщи. Нижняя толща сложена неслоистыми глинистыми, глинисто-хлоритовыми, хлорит серицитовыми сланцами, в верхах встречаются маломощные прослои гравелитов с обломками песчаников, кремней и криноидей. Средняя толща представлена органогенно-детритовыми известняками, переслаиванием пестроцветных глинистых сланцев и известняков. На севере острова толща состоит из глинистых сланцев, содержащих глыбы и валуны подстилающих пород, гравелитов, конгломератов, детритовых известняков, однообразных черных глинистых сланцев. Верхняя толща содержит черные неслоистые глинистые сланцы с прослоями тонко-среднезернистых песчаников, местами переходящих в гравелиты. Встречаются отдельные горизонты известковистых песчаников, переходящих в песчанистые органогенно-детритовые известняки. Общая мощность до 700 м.

Триас (Т)

Триасовые отложения распространены преимущественно на юге острова, где они залегают на глубоко размытой поверхности палеозойских пород и представлены чередованием от черных до темно-серых глинистых сланцев с мелкозернистыми кварцевыми турбидитными песчаниками, алевролитами и песчаниками с отдельными прослоями известняков и конгломератов. Верхняя часть триасовых отложений перекрыта четвертичным аллювием. Мощность 800-1500 м.

Палеоген-неоген (P-N)

Отложения палеоген-неогенового возраста представлены известковистыми алевролитами и хорошо уплотненными темно-серыми глинами, содержащими гравий и растительный детрит. Комплекс фрагментов пеллеципод и бриозой, фораминиферы, споры и пыльцы, а также диатомеи указывают на позднепалеоген-неогеновый возраст. Мощность несколько десятков метров.

Плиоцен-четвертичный (N₂-Q)

Плиоцен-четвертичные отложения перекрывают более древние породы на севере и юге острова. Отложения представлены уплотненными глинами с галькой и гравием, грубозернистыми кластическими осадками аллювиального, делювиального и коллювиального генезиса. По периферии острова обнажаются прибрежно-морские отложения. Мощность несколько метров.

3.3.3 Северная Аляска

В пределах Северной Аляски мощная серия пород, участвующая в строении сопредельной территории, делится на несколько комплексов: франклинский, элсмирский, рифтовый и брукинский (Sherwood, 1998).

Франклинский комплекс (докембрий - девон, PZ-D)

Породы, слагающие этот комплекс, обнажаются в пределах хребта Брукса, а также вскрыты многочисленными скважинами на побережье моря Бофорта и на поднятии Барроу. Комплекс содержит кварц-сланцевые сланцы, кварциты и филлиты докембрийского возраста; метаморфические, вулканогенно-осадочные, карбонатно-терригенные и кремнистые образования кембрийского и ордовикского возраста, силурийские доломиты, грубообломочные песчано-сланцевые и конгломератовые породы девона.

Элсмирский комплекс (поздний девон - ранний мел, D₃-K₁)

Отложения этого комплекса широко распространены в пределах Колвиллского бассейна, где они представлены известняками, глинистыми сланцами формаций Лисберн, Сиксикпук, Шублик, Кингак и, в меньшей степени, алевролитами, песчаниками, конгломератами. Комплекс ограничен снизу отражающим горизонтом EU. Мощность комплекса измеряется от первых десятков и сотен метров на севере поднятия Барроу и в предгорьях хребта Брукса до 2000-3000 м в центральной части Колвиллского бассейна.

Рифтовый комплекс (поздняя юра, J₃)

Связывается с заложением рифта вдоль Бофортской окраины. Комплекс сложен по большей части размытыми и переотложенными породами элсмирского комплекса, в

основном обломочными породами. Мощность меняется от 300-600 м в прогибе Ханна до 7000-9000 м в Северо-Чукотском прогибе, образуя мощную осадочную толщу.

Брукинский комплекс (ранний мел – четвертичный период, K₁-Q)

Отложения этого комплекса известны в предгорьях хребта Брукса и на северном побережье Аляски. В составе комплекса участвуют глины формаций Торок (ранний мел) и Пебп-Шейл (ранний мел), песчаники, аргиллиты, глины и угленосные породы группы Нанушук; глины, аргиллиты, песчаники с гравелитами в основании Колвиллской группы (поздний мел - кайнозой); конгломераты, гравелиты, песчаники, аргиллиты и угли формации Согаванирктон (кайнозой). Комплекс ограничен снизу отражающим горизонтом JU, но в Северо-Чукотском бассейне подстилается рифтовым комплексом. Суммарная мощность превышает 1000 м.

3.3.4 Стратиграфические комплексы Чукотского моря

Представление о строении осадочного чехла бассейнов Чукотского моря составлено на основе вышеприведенных данных по сопредельным сухопутным территориям, американским скважинам на побережье Аляски и данным сейсморазведки. Выделяются акустический фундамент и осадочный чехол. В свою очередь, в составе осадочного чехла прослеживается ряд комплексов, соответствующих наиболее характерным стратиграфическим единицам сопредельных бассейнов Чукотского моря и изученных более детально в пределах американской акватории: элсмирский (нижнеэлсмирский и верхнеэлсмирский), рифтовый и брукинский (нижнебрукинский и верхнебрукинский) комплексы (Sherwood, 1998) (рис.9). Комплексы выделяются по отражающим горизонтам, которые интерпретируются как поверхности несогласия (рис.10):

- а) Mid Brookian Unconformity (mBU);
- б) Brookian Unconformity (BU);
- в) Jurassic Unconformity (JU);
- г) Permian Unconformity (PU);
- д) Ellesmerian Unconformity (EU).

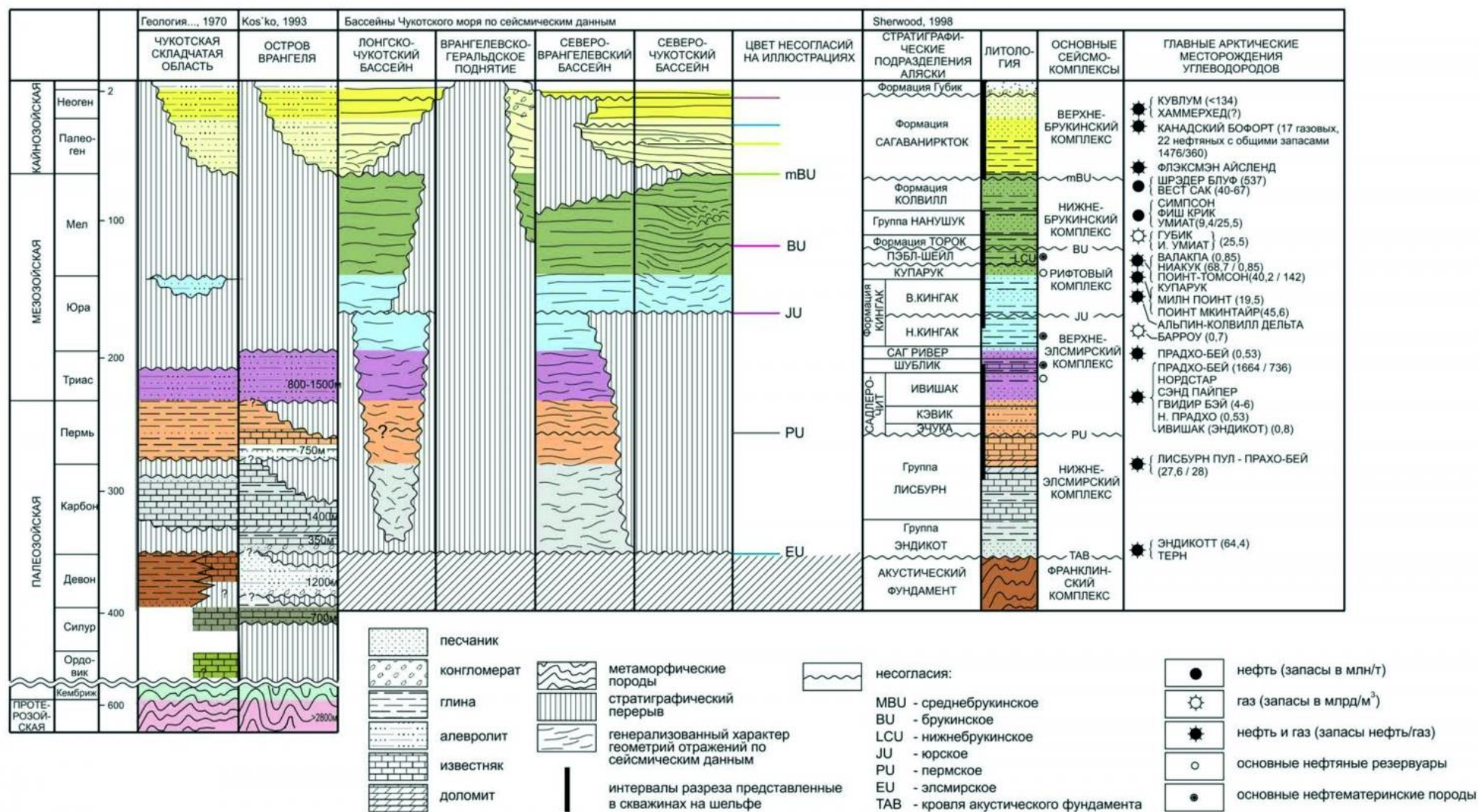


Рисунок 9. Стратиграфическая корреляция разрезов Чукотки, Аляски и бассейнов Чукотского моря (Дальморнефтегеофизика, 2002)

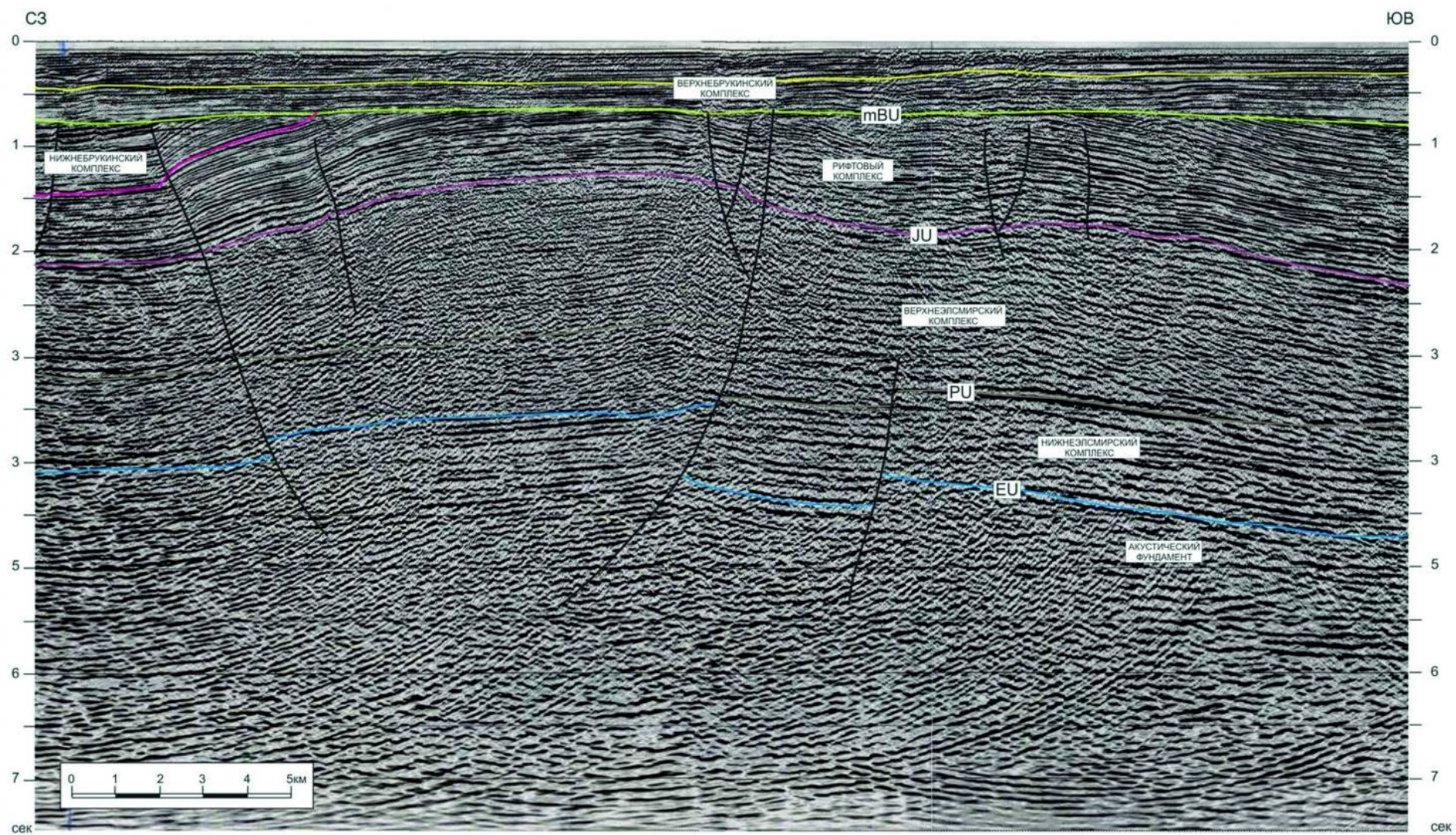


Рисунок 10. Сейсмический профиль северо-западной части Южно-Чукотского бассейна (Дальморнефтегеофизика, 2002)

4 ГАЗОВЫЕ ГИДРАТЫ

4.1 Общие положения

Газовые гидраты - это льдоподобные кристаллические соединения, которые образуются при определённых температурах и давлениях из молекул воды и низкомолекулярного газа (CH_4 , C_2H_6 , CO_2 , N_2 и др.). Известные залежи и проявления гидратов газа обычно представлены метаном с незначительными примесями кристаллов других газов. Помимо достаточного количества газа и воды необходимы наличие коллекторов и покрышек, и путей поступления газа и воды к коллектору. Эти условия ставят газовые гидраты в один ряд с другими углеводородами, которые являются полезными ископаемыми (Друщиц, 2011).

В последнее время проявляется повышенный интерес к газовым гидратам, как потенциальному горючему ископаемому, как возможным источникам поступления парникового газа в атмосферу, как фактору, влияющему на природную устойчивость континентальных склонов, как компонентам среды, осложняющим хозяйственную деятельность при освоении природных морских ресурсов. Согласно имеющимся оценкам, содержание газа в газовых гидратах составляет от $2 \cdot 10^{14}$ до $7,6 \cdot 10^{18} \text{ м}^3$ (Соловьев, 2003).

Основное внимание уделяется газовым гидратам, существующим в акваториях, т.к. именно здесь сосредоточены основные ресурсы и субмаринное гидратообразование обуславливает накопление газа, тогда как в условиях арктической суши скопления гидратов могут появляться только за счет трансформации ранее существующих залежей газа при экзогенном охлаждении недр. Важно рассматривать именно скопления газовых гидратов, поскольку маловероятно их существование в рассеянном состоянии (Соловьев, 2003).

Имеется два типа скоплений гидратов: связанные с очагами разгрузки флюидов на дне морей, формирующиеся вблизи дна, и прямо не связанные с очагами разгрузки, находящиеся на значительной поддонной глубине. Образования скоплений гидратов и их расположение зависит от термобарических условий; температурных полей, определяющих растворимость газа в воде; поля проницаемости, определяющего условия миграции флюидов; солёности вод, влияющей на растворимость; условий генерации флюида.

На сегодняшний день выявлены три типа газогидратов (I, II и H). Газогидраты I типа наиболее распространены; они представлены преимущественно молекулами биогенного метана. Газогидраты II и H типов могут содержать более крупные молекулы, составляющие термогенный газ (Анфилатова, 2008).

4.2 Методика оценки

Первоначально, проанализировав тектонические карты исследуемых регионов, выделяются перспективные на гидраты зоны, обладающие мощным осадочным чехлом. Без этого условия маловероятна возможность формирования катагенетического метана, необходимого для образования гидратов, потому что метана, формирующегося в диагенезе, зачастую недостаточно для перенасыщения поровых вод. В рамках этого условия выдвигается предположение о том, что наиболее подходящими зонами будут служить такие тектонические структуры как прогибы.

Следом выполняется сравнение главных термобарических условий шельфа Восточной Арктики и теоретических условий стабильности газовых гидратов в данных условиях, таких как давление на глубине, температура воды у дна, соленость воды, средний геотермический градиент. В программе Hydrate prediction program (Hydoff) на основе данных о солености морей, моделируются различные содержания главных химических компонентов газовых гидратов, а именно метана и этана, и подсчитываются необходимые давления для поддержания стабильности гидратов. От солености воды зависит термодинамика процесса гидратообразования. Т.к. в кристаллическую решетку включается только пресная вода, чем больше минерализация воды, тем сложнее образовываться гидратам, тем большее давление и более низкая температура необходима. И, напротив, чем минерализация меньше, тем при более низких давлениях и высоких температурах возможно гидратообразование. Также, исследования газовых гидратов в мире показывают, что преимущественно распространены метановые гидраты, с практически 100% содержанием метана и минимальными значениями прочих углеводородных газов. Не так часто встречаются, но все же имеют место быть, гидраты с примерными содержаниями метана 95% и 85%, где оставшуюся долю по большей части занимает этан, 5% и 15% соответственно, или иногда пропан и бутан. Из этана, в сравнении с метаном, гидраты образуются при значительно меньшем давлении. Возможны и другие случаи, но здесь будут рассмотрены только эти, встречающиеся наиболее часто. На основании смоделированных данных в программе Excel строится кривая теоретической стабильности газовых гидратов, для каждой перспективной на гидраты территории с разным содержанием метана, где по вертикальной оси откладывается глубина от уровня мирового океана в метрах, а по горизонтальной – температура в градусах Цельсия. Глубина примерно соответствует частному от давления столба жидкости на плотность воды и ускорение свободного падения (1):

$$H = P/\rho g, \quad (1)$$

где: H – глубина, м;

P – давление столба жидкости, Па;

ρ – плотность воды, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Далее в Excel на тем же графиках, где отображены теоретические кривые, строятся линии изменения температуры с глубиной по данным о глубине дна по изобатам батиметрических карт GEBCO – 0 м, 50 м, 100 м и соответствующей температуре у дна – это будет являться начальной точкой прямой, и о геотермическом градиенте – непосредственно изменению температуры на каждый 1 км, т.е. угле наклона данной прямой. Эти линии будут являться практическими прямыми для расчета зоны стабильности.

В результате получаются несколько графиков по каждой перспективной территории с различным возможным содержанием метана и для разных глубин. По точкам пересечения теоретической кривой стабильности гидратов и прямой, отображающей изменение температуры с глубиной, можно отстроить предполагаемую зону стабильности газовых гидратов, где возможно их формирование и сохранение, рассчитать уровень кровли и подошвы зоны, взятые в абсолютных значениях, ее мощность.

После рассматривается возможность насыщения гидратов метаном. Предел растворимости метана для атмосферного давления 1.4 мМ. Т.е. для образования гидратов из 100% метана концентрации метана должны быть больше этой величины. Это условие добавляется в список необходимых для формирования газовых гидратов, и изучаются данные по известным концентрациям метана в донных отложениях.

На основе всех смоделированных и проанализированных данных и графиков, в программе ArcGIS строится карта возможного залегания газовых гидратов, на которой отображаются перспективные на гидраты территории вместе с их зоной стабильности. Здесь же рассчитываются площади данных зон по изобатам батиметрических карт. В объеме зоны стабильности представляют собой очень сложно устроенные фигуры, так что для того, чтобы подсчитать объем такой зоны, она аппроксимируется до многогранной усеченной призмы в поперечном сечении представленной прямоугольной трапецией. Основания этой трапеции равны мощности зоны стабильности. Таким образом, можно, хоть и с большой погрешностью, вычислить объем перспективных зон. Далее принимается в учет коэффициент гидратонасыщения 5-10%, зависящий от разных параметров. Это значит, что максимум 10% донных отложений может содержать газовые гидраты, так что все следующие значения стоит считать максимально возможными. Используя этот коэффициент, рассчитывается объем газовых гидратов, содержащихся в донных отложениях шельфа. Для определения количества метана в этих гидратах используется рассчитанное американскими учеными по наиболее изученным газогидратным скоплениям гидратное число 6,325, что

соответствует выходу 164 м³ метана на 1 м³ гидратов. В итоге после всех вычислений можно примерно оценить максимально возможный объем метана в газовых гидратах, залегающих в пределах исследуемой территории.

4.3 Газовые гидраты моря Лаптевых

В пределах моря Лаптевых был рассмотрен Анисинский прогиб, являющийся частью Новосибирской системы грабен и горстов, располагающийся на северо-востоке моря на границе с Восточно-Сибирским морем. Исходя из карты структур Восточно-Арктического шельфа России мощность его осадочного чехла доходит до 7 км. Соленость моря в данной области порядка 29 ‰, температура воды у дна -1,4 °С и с углублением на север уменьшается до -1,6 °С, а геотермический градиент примерно равен 25°С/км. На основе этих данных были рассчитаны значения теоретических кривых для различных содержаний метана и этана: 100% CH₄, 95% CH₄ и 5% C₂H₆, 85% CH₄ и 15% C₂H₆ (табл. 1), построены графики зоны стабильности газовых гидратов с теоретическими кривыми и практическими прямыми (рис.11).

Таблица 1. Значения теоретических кривых стабильности газовых гидратов для Анисинского и Новосибирского прогибов

Теоретические кривые											
100% метан				95% Метан, 5 % Этан				85% Метан, 15 % Этан			
T, °C	T, K	P, кПа	P, м	T, °C	T, K	P, кПа	P, м	T, °C	T, K	P, кПа	P, м
-5	268,15	2240,587	224,1	-5	268,15	1623,475	162,3	-5	268,15	1078,246	107,8
-4	269,15	2306,999	230,7	-4	269,15	1679,367	167,9	-4	269,15	1119,256	111,9
-3	270,15	2374,895	237,5	-3	270,15	1736,697	173,7	-3	270,15	1161,503	116,2
-2	271,15	2444,302	244,4	-2	271,15	1795,495	179,5	-2	271,15	1204,991	120,5
-1	272,15	2688,132	268,8	-1	272,15	1977,727	197,8	-1	272,15	1325,705	132,6
0	273,15	2954,210	295,4	0	273,15	2185,027	218,5	0	273,15	1469,656	147,0
1	274,15	3248,013	324,8	1	274,15	2415,071	241,5	1	274,15	1630,817	163,1
2	275,15	3572,849	357,3	2	275,15	2670,692	267,1	2	275,15	1809,452	180,9
3	276,15	3932,531	393,3	3	276,15	2955,236	295,5	3	276,15	2008,709	200,9
4	277,15	4331,440	433,1	4	277,15	3272,599	327,3	4	277,15	2231,374	223,1
5	278,15	4774,685	477,5	5	278,15	3627,150	362,7	5	278,15	2480,703	248,1
6	279,15	5268,175	526,8	6	279,15	4024,387	402,4	6	279,15	2760,609	276,1
7	280,15	5818,839	581,9	7	280,15	4470,546	447,1	7	280,15	3075,725	307,6
8	281,15	6439,722	644,0	8	281,15	4973,279	497,3	8	281,15	3431,692	343,2
9	282,15	7133,460	713,3	9	282,15	5546,742	554,7	9	282,15	3835,396	383,5
10	283,15	7914,936	791,5	10	283,15	6195,015	619,5	10	283,15	4295,310	429,5
								11	284,15	4827,720	482,8
								12	285,15	5439,241	543,9
								13	286,15	6151,777	615,2
								14	287,15	6989,661	699,0
								15	288,15	7985,863	798,6

На графике зоны стабильности при содержании 100% метана пересечения линий не наблюдается из чего можно утверждать, что формирование газовых гидратов в данных условиях невозможно на любых глубинах, а при содержании 95% метана и 5% этана касание можно упустить вследствие постоянной изменчивости условий, т.к. условий для постоянного формирования и сохранения не будет.

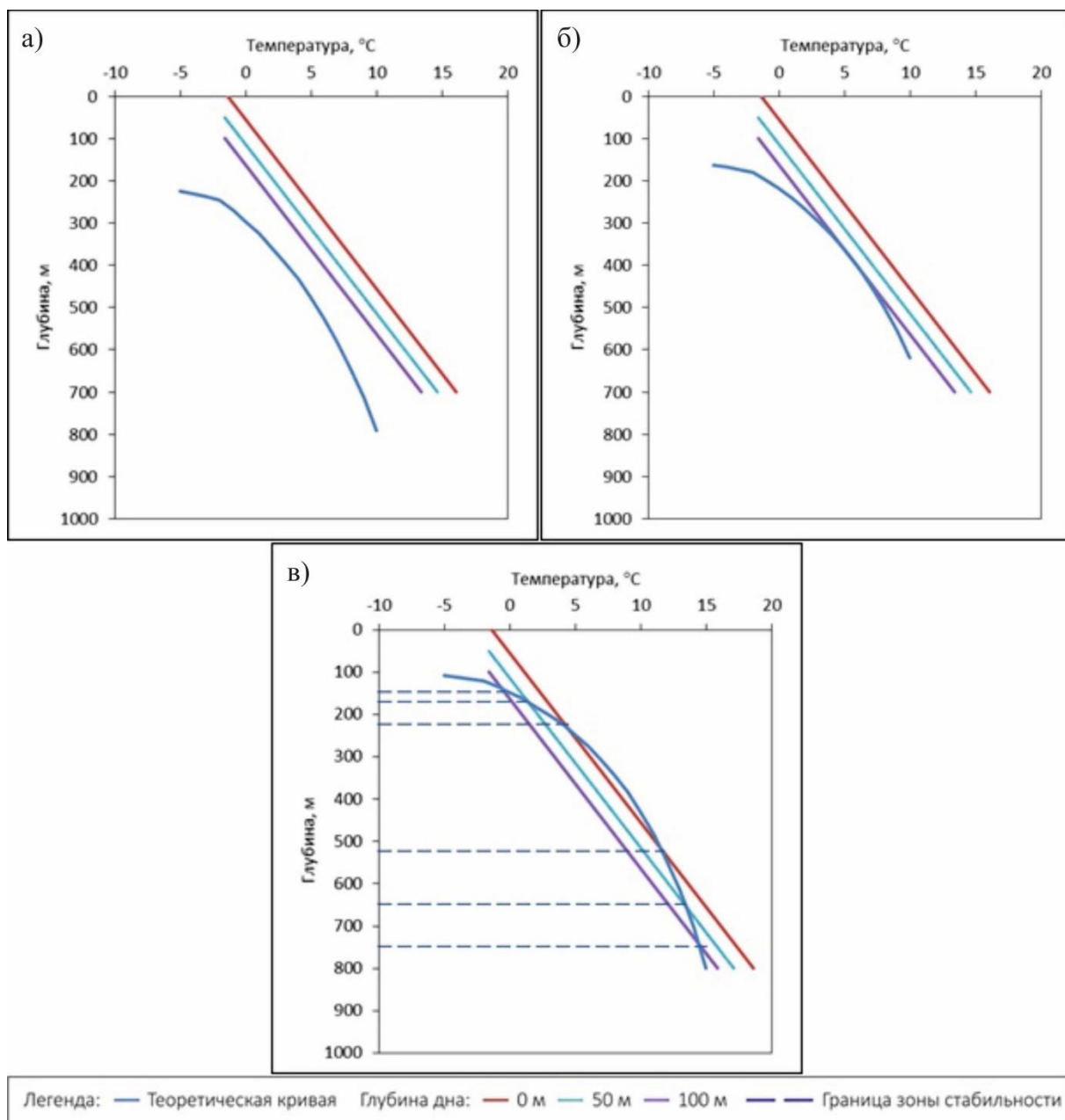


Рисунок 11. Зона стабильности газовых гидратов для Анисинского и Новосибирского прогибов

Содержание компонентов: а) 100% CH₄; б) 95% CH₄ + 5% C₂H₆; в) 85% CH₄ + 15% C₂H₆.

Другая ситуация наблюдается при повышенном содержании этана – 15%, условия формирования смягчаются, и наблюдается полноценная зона стабильности на всех глубинах моря (рис.11). В данном случае при глубине моря от 0 м, кровля зоны располагается на уровне 236 м, подошва на 524 м, а ее мощность равняется 288 м; от 50 м кровля – 170 м, подошва – 655 м, мощность – 485 м; от 100 м кровля – 136 м, подошва – 745 м, мощность – 609 м. Таким образом, газовые гидраты в море Лаптевых могут формироваться только при предположении, что доля этана в них приблизительно равна 15%, при содержании метана порядка 85%. В дополнение ко всему, отдельно была рассчитана мощность зоны стабильности для глубины более 200 м, что потребуется в последующем подсчете ее объема.

4.4 Газовые гидраты Восточно-Сибирского моря

В Восточно-Сибирском море в плане гидратоносности выделяются Новосибирский прогиб, схожий по термобарическим условиям с Анисинским прогибом и, также, являющийся частью Новосибирской системы грабен и горстов, и Восточно-Сибирский прогиб – часть Чукотско-Восточно-Сибирского бассейна. Первый находится на северо-западе моря, а второй - на северо-востоке. Мощность осадочного чехла данных структур, по той же карте структур Восточно-Арктического шельфа, может достигать до 12 км. В плане солености моря, температуры на дне и геотермического градиента Новосибирский прогиб практически не отличается от Анисинского, поэтому для него будут использоваться те же значения теоретических кривых, зависимости температуры от глубины и графики зон стабильности (рис.11). Т.е. можно сделать такие же выводы: формирование гидратов возможно только при повышенном содержании этана (15%) на любых глубинах.

Однако, в Восточно-Сибирском прогибе условия отличаются, соленость моря здесь достигает до 32 ‰, а температура на дне от -1,6 до -1,8 °С, геотермический градиент приблизительно равен 28 °С/км. Аналогично с Анисинским прогибом, моделируются теоретические значения стабильности гидратов (табл.2), выносятся на графики теоретические и практические значения, строятся зоны стабильности для разного содержания компонентов и глубины (рис.12).

На графиках зон стабильности при содержании и 100%, и 95% метана, как и в предыдущем случае, отсутствует пересечение теоретических и практических линий, соответственно газовые гидраты с таким соотношением компонентов в данных термобарических условиях формироваться не будут.

Таблица 2. Значения теоретических кривых стабильности газовых гидратов для Восточно-Сибирского прогиба

Теоретические кривые											
100% метан				95% метан, 5% этан				85% метан, 15% этан			
T, °C	T, K	P, кПа	P, м	T, °C	T, K	P, кПа	P, м	T, °C	T, K	P, кПа	P, м
-5	268,15	2240,587	224,1	-5	268,15	1623,475	162,3	-5	268,15	1078,246	107,8
-4	269,15	2306,999	230,7	-4	269,15	1679,367	167,9	-4	269,15	1119,26	111,9
-3	270,15	2374,895	237,5	-3	270,15	1736,697	173,7	-3	270,15	1161,5	116,2
-2	271,15	2444,302	244,4	-2	271,15	1795,495	179,5	-2	271,15	1204,99	120,5
-1	272,15	2721,155	272,1	-1	272,15	2002,342	200,2	-1	272,15	1342,25	134,2
0	273,15	2990,757	299,1	0	273,15	2212,441	221,2	0	273,15	1488,078	148,8
1	274,15	3288,514	328,9	1	274,15	2445,614	244,6	1	274,15	1651,45	165,1
2	275,15	3617,801	361,8	2	275,15	2704,817	270,5	2	275,15	1832,53	183,3
3	276,15	3982,509	398,3	3	276,15	2993,391	299,3	3	276,15	2034,57	203,5
4	277,15	4387,129	438,7	4	277,15	3315,347	331,5	4	277,15	2260,43	226,0
5	278,15	4836,847	483,7	5	278,15	3675,238	367,5	5	278,15	2513,404	251,3
6	279,15	5337,731	533,8	6	279,15	4078,601	407,9	6	279,15	2797,54	279,8
7	280,15	5896,873	589,7	7	280,15	4531,885	453,2	7	280,15	3117,59	311,8
8	281,15	6527,889	652,8	8	281,15	5042,858	504,3	8	281,15	3479,33	347,9
9	282,15	7233,110	723,3	9	282,15	5626,472	562,6	9	282,15	3889,85	389,0
10	283,15	8027,997	802,8	10	283,15	6286,441	628,6	10	283,15	4357,865	435,8
								11	284,15	4900,592	490,1
								12	285,15	5524,49	552,4
								13	286,15	6252,34	625,2
								14	287,15	7109,95	711,0
								15	288,15	8131,12	813,1

Несмотря на это, в случае содержания 85% метана и 15% этана, можно отметить наличие зоны стабильности при глубинах более 50 м. Так, начиная с глубины от 50 м, верхняя граница этой зоны располагается на уровне 181 м, а нижняя – на 532 м. Опускаясь до 100 м и дальше, верхняя граница смещается до 142 м, а нижняя – до 625 м. Получается, что мощность зоны растет с 351 до 483 м. Отдельно рассчитана мощность зоны стабильности при глубине от 200 м – порядка 592 м.

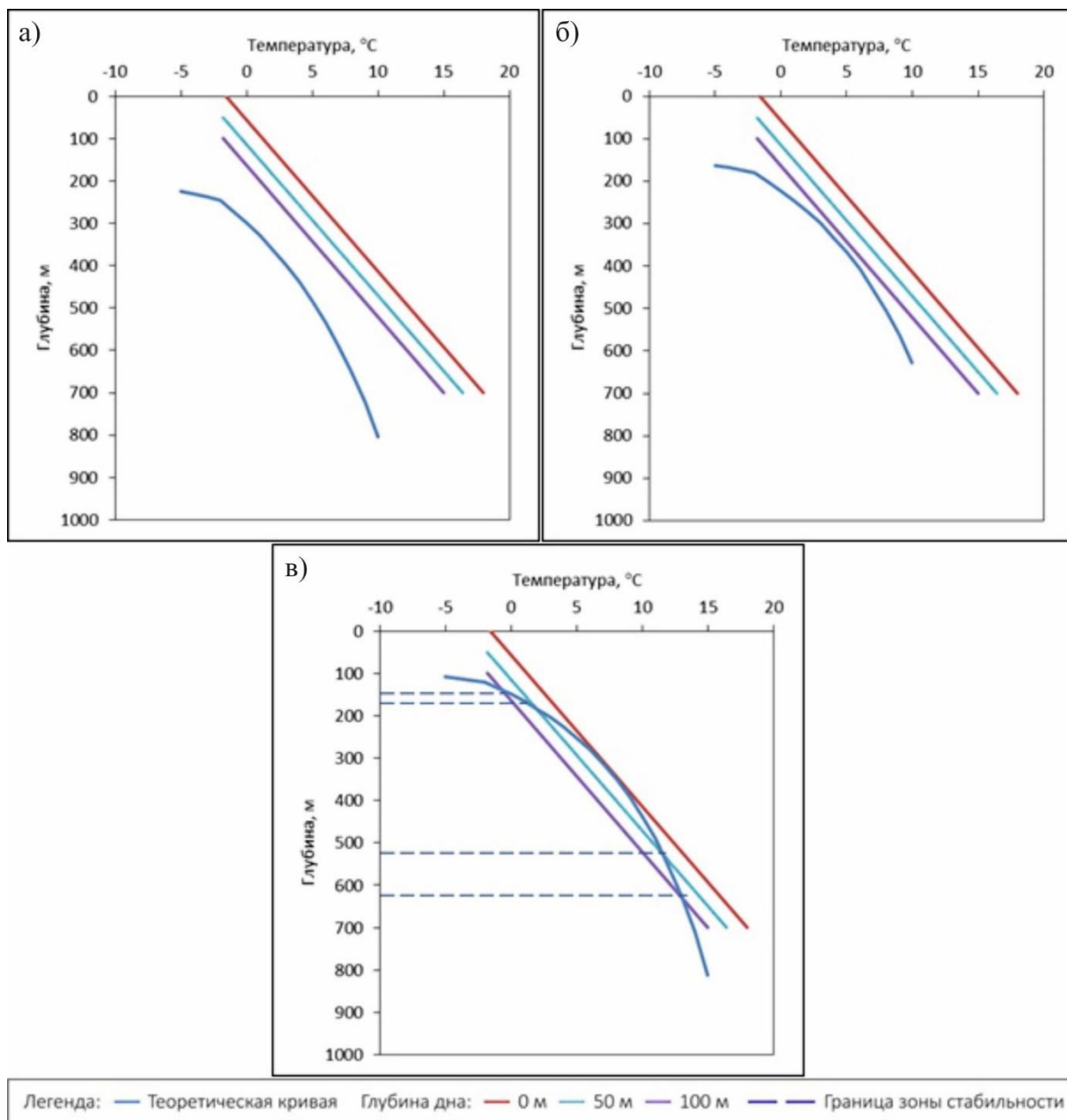


Рисунок 12. Зона стабильности газовых гидратов для Восточно-Сибирского прогиба
Содержание компонентов: а) 100% CH₄; б) 95% CH₄ + 5% C₂H₅; в) 85% CH₄ + 15% C₂H₅.

4.5 Газовые гидраты Чукотского моря

В плане перспектив на газогидраты в Чукотском море выделяются Северо-Чукотский и Южно-Чукотский прогибы, располагающиеся, соответственно, в северной и южной частях моря. Мощная осадочная толща достигает 20 км на севере и 7 км на юге по уже упоминавшейся карте структур Восточно-Арктического шельфа. Соленость моря достигает 33 ‰, температура на глубине меняется от -1,5 °C на юге и -1,6 °C на севере до -1,8

°С. Геотермический градиент отличается, для Северо-Чукотского прогиба это около 28 °С/км, а для Южно-Чукотского – 30 °С/км. Таким образом, значения теоретических кривых для обоих прогибов отличаться не будут (табл.3), но разными будут зависимости температуры от глубины, т.е. практические значения, что можно отметить на графиках зоны стабильности для каждого из прогибов (рис.13,14).

Как и в предыдущих случаях, при малом содержании этана (100% метана и 95% метана) условия формирования гидратов недостаточно смягчены, зоны стабильности наблюдаться не будет как в Северо-Чукотском, так и в Южно-Чукотском прогибе, вне зависимости от глубины моря.

Таблица 3. Значения теоретических кривых стабильности газовых гидратов для Северо-Чукотского и Южно-Чукотского прогибов

Теоретические кривые											
100% метан				95% Метан, 5 % Этан				85% Метан, 15 % Этан			
T, °C	T, K	P, кПа	P, м	T, °C	T, K	P, кПа	P, м	T, °C	T, K	P, кПа	P, м
-5	268,15	2240,587	224,1	-5	268,15	1623,475	162,3	-5	268,15	1078,246	107,8
-4	269,15	2306,999	230,7	-4	269,15	1679,367	167,9	-4	269,15	1119,256	111,9
-3	270,15	2374,895	237,5	-3	270,15	1736,697	173,7	-3	270,15	1161,503	116,2
-2	271,15	2486,875	248,7	-2	271,15	1820,319	182,0	-2	271,15	1215,943	121,6
-1	272,15	2732,329	273,2	-1	272,15	2010,682	201,1	-1	272,15	1347,847	134,8
0	273,15	3003,120	300,3	0	273,15	2221,706	222,2	0	273,15	1494,316	149,4
1	274,15	3302,224	330,2	1	274,15	2455,952	245,6	1	274,15	1658,425	165,8
2	275,15	3633,016	363,3	2	275,15	2716,359	271,6	2	275,15	1840,345	184,0
3	276,15	3999,431	399,9	3	276,15	3006,315	300,6	3	276,15	2043,335	204,3
4	277,15	4405,979	440,6	4	277,15	3329,829	333,0	4	277,15	2270,244	227,0
5	278,15	4857,907	485,8	5	278,15	3691,523	369,2	5	278,15	2524,492	252,4
6	279,15	5361,308	536,1	6	279,15	4096,967	409,7	6	279,15	2810,062	281,0
7	280,15	5923,318	592,3	7	280,15	4552,690	455,3	7	280,15	3131,776	313,2
8	281,15	6557,803	655,8	8	281,15	5066,458	506,6	8	281,15	3495,479	349,5
9	282,15	7266,921	726,7	9	282,15	5653,528	565,4	9	282,15	3908,298	390,8
10	283,15	8066,374	806,6	10	283,15	6317,454	631,7	10	283,15	4379,136	437,9
								11	284,15	4925,379	492,5
								12	285,15	5553,484	555,3
								13	286,15	6286,661	628,7
								14	287,15	7150,881	715,1
								15	288,15	8180,627	818,1

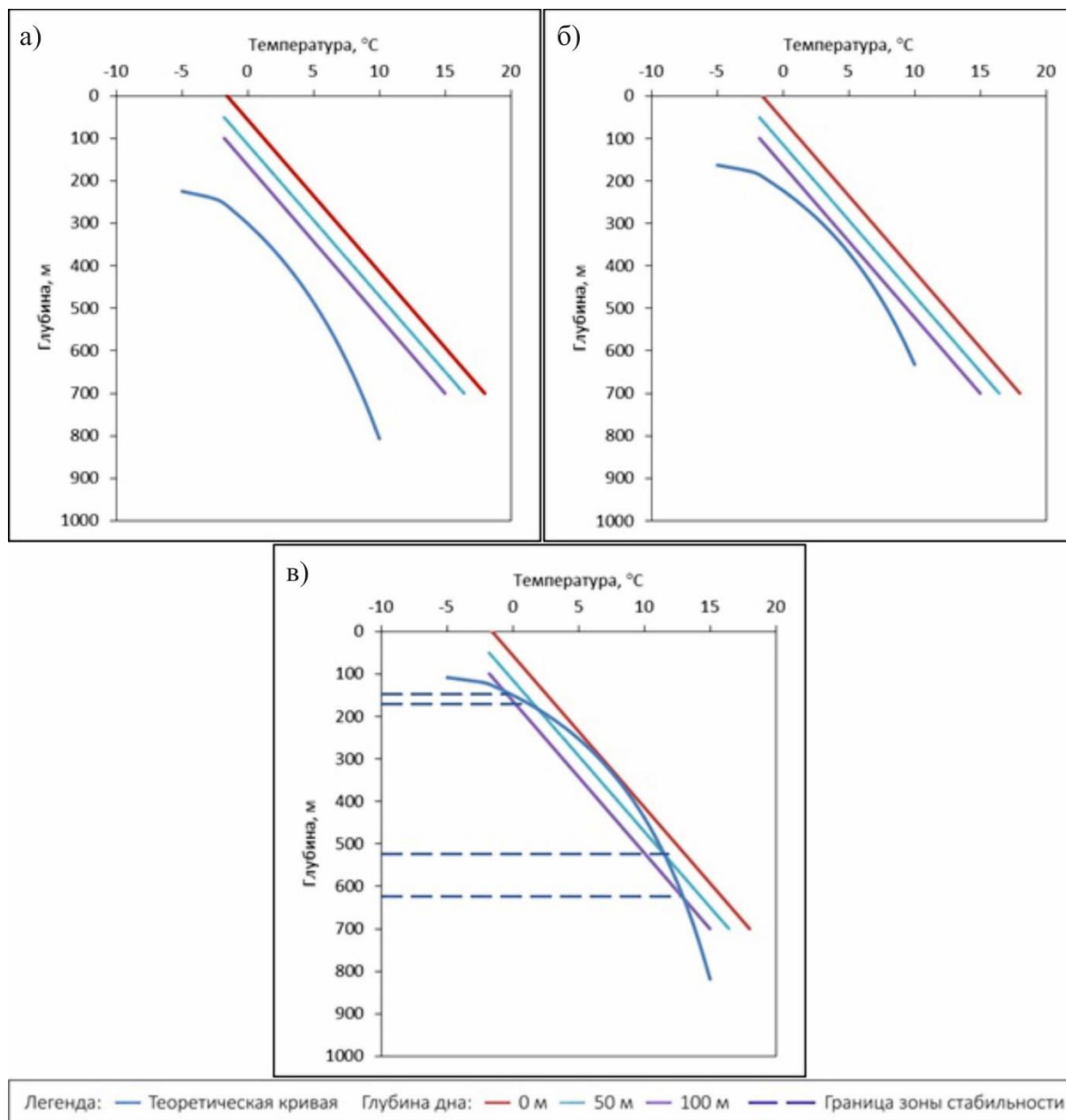


Рисунок 13. Зона стабильности газовых гидратов для Северо-Чукотского прогиба
Содержание компонентов: а) 100% CH₄; б) 95% CH₄ + 5% C₂H₅; в) 85% CH₄ + 15% C₂H₅.

Нельзя, однако, сказать того же при повышении доли этана до 15%, в таком случае газовые гидраты могут формироваться на обеих территориях, как видно из графиков, на глубинах моря более 50 м. В Северо-Чукотском прогибе с увеличением глубины от 50 до 100 м уровень кровли зоны стабильности меняется с 185 до 140 м, а подошвы – с 510 до 628 м, в пределах же Южно-Чукотского прогиба глубина моря особо не варьирует после прохождения отметки в 50 м, поэтому кровля отмечена на 210 м, подошва – на 430 м. Таким образом, мощность зоны на севере будет меняться с 325 до 488 м, а на юге оставаться

примерно равной 220 м. Также, для последующих подсчетов в Северо-Чукотском прогибе подсчитана мощность зоны стабильности при глубинах с 200 м – не менее 590 м.

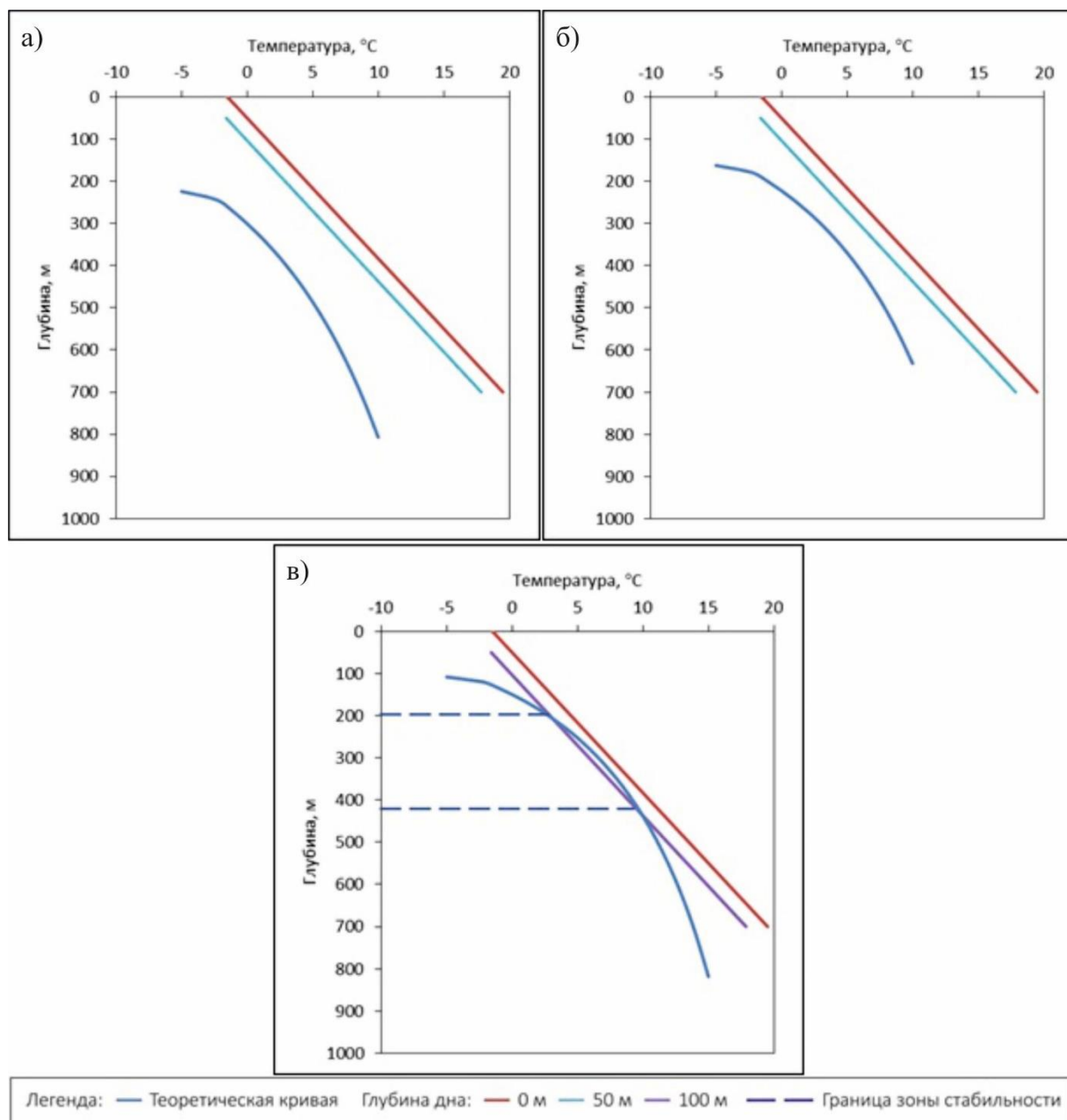


Рисунок 14. Зона стабильности газовых гидратов для Южно-Чукотского прогиба
Содержание компонентов: а) 100% CH₄; б) 95% CH₄ + 5% C₂H₅; в) 85% CH₄ + 15% C₂H₅.

Ко всему прочему, в Чукотском море, благодаря российско-американским исследованиям (Matveeva et al, 2015), известны концентрации метана в донных отложениях по нескольким станциям отбора. Значит, можно рассмотреть возможность насыщения гидратов метаном. В пределах зоны стабильности гидратов располагается одна станция отбора – НС-10, в Южно-Чукотском прогибе, где концентрация метана близка к 2 мМ

(рис.15). Этого значения достаточно для формирования гидратов из 100% метана, а, в таком случае, и для гидратов с меньшим его содержанием.

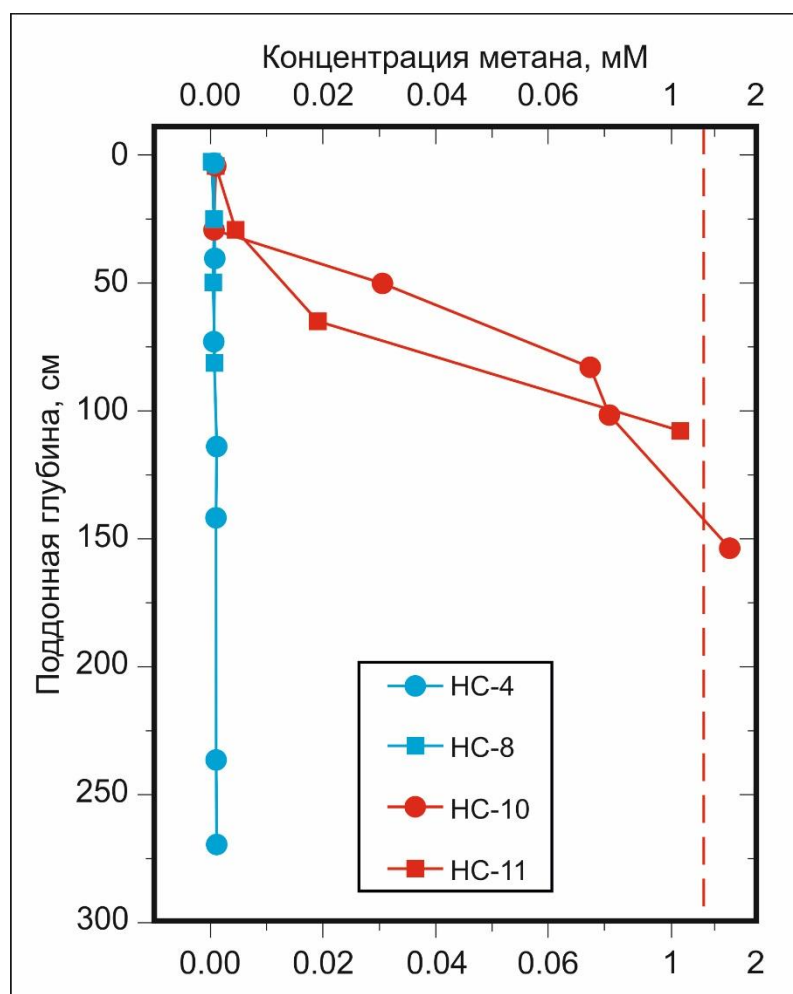


Рисунок 15. Содержание метана в донных отложениях Чукотского моря (по данным Matveeva et al, 2015)

4.6 Газогидратоносность Восточно-Арктического шельфа

На основе карт о тектоническом районировании и смоделированных данных о зонах стабильности газовых гидратов в программе ArcGIS построена карта возможного залегания газовых гидратов в пределах Восточно-Арктического шельфа при содержании в них порядка 85% метана и 15% этана (рис.16). В других случаях с другим содержанием этих компонентов расчеты показали, что формирование и нахождение гидратов в стабильном состоянии невозможны. На данной карте обозначены перспективные на гидраты структуры, а именно прогибы: Анисинский, Новосибирский, Восточно-Сибирский, Северо-Чукотский и Южно-Чукотский, и зоны стабильности газовых гидратов в зависимости от глубины моря на конкретных территориях.

Карта возможного залегания газогидратов в пределах Восточно-Арктического шельфа

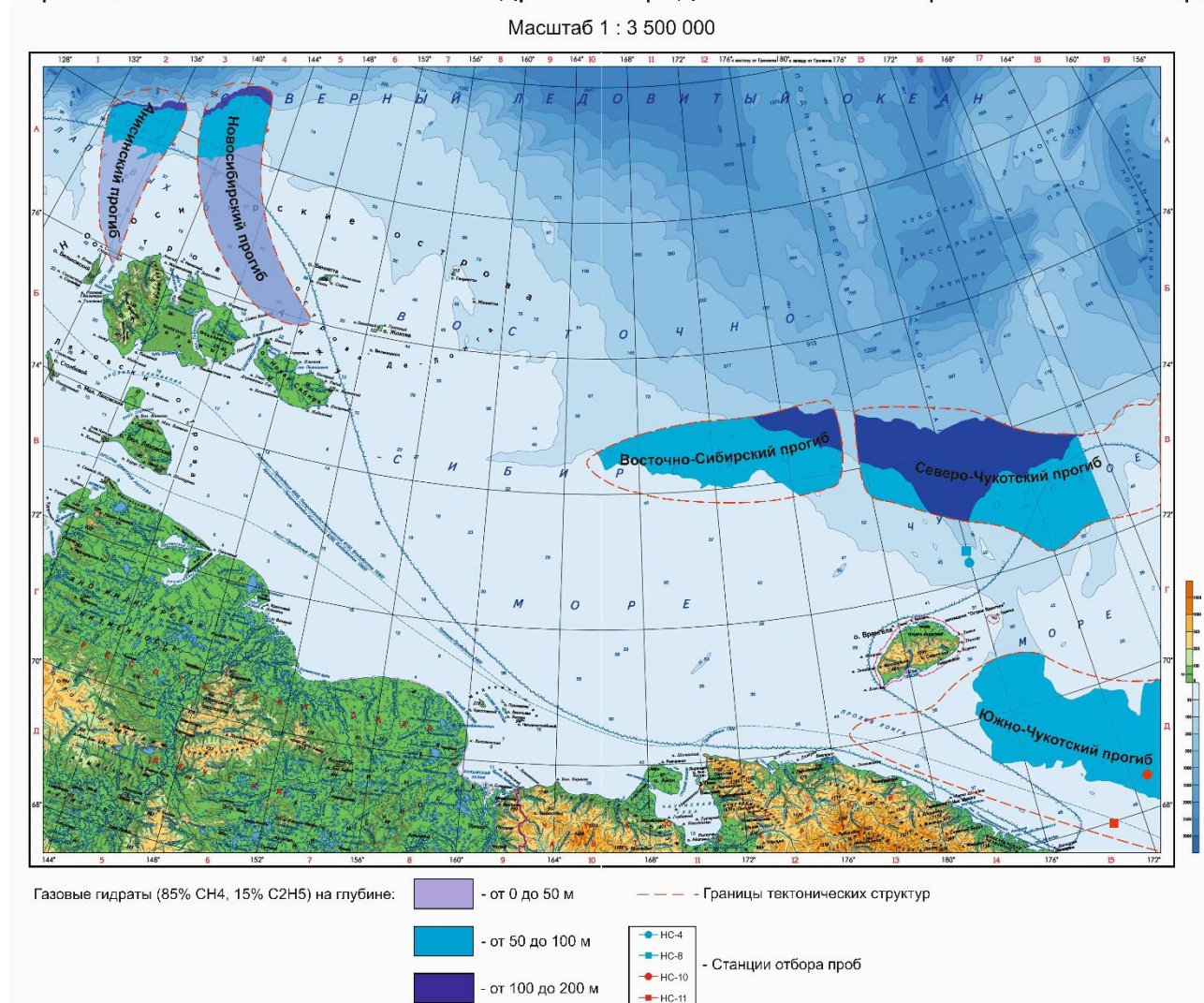


Рисунок 16. Карта возможного залегания газовых гидратов в пределах Восточно-Арктического шельфа (на основе физико-географической карты с сайта <https://geographyofrussia.com>)

Следующим шагом стал подсчет площадей и объемов зон стабильности, максимальный объем газовых гидратов в пределах этих зон и предельное количество содержащегося в них метана согласно методике, описанной выше в разделе 4.2. Результаты этих расчетов, как по каждой перспективной структуре, так и в целом по всей исследуемой акватории, отображены в таблице 4, где Н з.с. – мощность зоны стабильности, S з.с. – площадь зоны стабильности, V з.с. – объем зоны стабильности, V max г.г. – максимальный объем газовых гидратов, V max CH₄ – максимальный объем содержащегося в гидратах метана.

Таблица 4. Перспективы газогидратонности Восточно-Арктического шельфа

Территория			Северо-Чукотский прогиб	Южно-Чукотский прогиб	Восточно-Сибирский прогиб	Новосибирский прогиб	Анисинский прогиб	Восточно-Арктический шельф
Границы з.с. при глубине от, (м)*	0 м	Верхняя	-	-	-	236	236	-
		Нижняя	-	-	-	524	524	-
	50 м	Верхняя	185	210	181	170	170	-
		Нижняя	510	430	532	655	655	-
	100 м	Верхняя	140	-	142	136	136	-
		Нижняя	628	-	625	745	745	-
	200 м	Верхняя	200	-	200	200	200	-
		Нижняя	790	-	792	895	895	-
Н з.с., (м)	0 - 50 м		-	-	-	288	288	-
	50 - 100 м		325	220	351	485	485	-
	100 - 200 м		488	-	483	609	609	-
	200 + м		590	-	592	695	695	-
S з.с., (тыс. км²)	0 - 50 м		-	-	-	23,6	16,2	-
	50 - 100 м		27,8	62,4	33,5	11,3	6,9	-
	100 - 200 м		41,2	-	6,4	3,1	1,9	-
	Всего		69,0	62,4	39,9	38,0	25,0	234,3
V з.с., (тыс. км³)			13401,9	13728,0	4494,6	13184,4	7195,9	52004,8
V max г.г., (трлн. м³)			1,3	1,4	0,4	1,3	0,7	5,2
V max CH4, (трлн. м³)			181,2	195,2	55,8	181,2	97,6	724,9
з.с. - зона стабильности, г.г. - газовые гидраты. *При содержании в газовых гидратах 85% CH4 + 15% C2H5								

з.с. - зона стабильности, г.г. - газовые гидраты. *При содержании в газовых гидратах 85% CH₄ + 15% C₂H₆

Таким образом, Восточно-Арктический шельф может содержать до 5,2 трлн. м³ газовых гидратов, при условии, что содержание метана в них 85%, а этана – 15%, и, вследствие чего, максимальный объем содержащегося в них метана не более 724,9 трлн. м³. Однако не стоит забывать, что все это максимально возможные значения, фактический же объем будет значительно меньше. К тому же наиболее распространены газовые гидраты, рассмотренные, содержащие практически только метан, так что достаточно сильно снижается вероятность других случаев. Поэтому, наиболее вероятно, что условия Восточно-Арктического шельфа не подходят для формирования и сохранения газовых гидратов в стабильном состоянии.

Возвращаясь к этому предположению, можно примерно представить ситуацию во время последнего ледникового максимума 26 тыс. лет назад, когда уровень мирового океана был на 125 м ниже настоящего, а температура в среднем меньше на 8,5 °С (Друщиц, 2011).

Это значит, что большая часть акватории Восточно-Арктического шельфа на тот момент не была покрыта водой, т.е. соленость воды можно не учитывать, а начальную температуру поверхности взять равной около -10°C . Как и в предыдущих разделах, были предположительно смоделированы значения теоретической кривой стабильности газовых гидратов при условии, что главным компонентом последних являлся метан, содержание которого было близко к 100% (табл.5).

Таблица 5. Значения теоретической кривой стабильности газовых гидратов для Восточно-Арктического шельфа во время последнего ледникового максимума

Теоретическая кривая			
100% метан			
T, $^{\circ}\text{C}$	T, K	P, кПа	P, м
-5	268,15	2240,587	224,1
-4	269,15	2306,999	230,7
-3	270,15	2374,895	237,5
-2	271,15	2444,302	244,4
-1	272,15	2515,230	251,5
0	273,15	2545,911	254,6
1	274,15	2895,298	289,5
2	275,15	3181,859	318,2
3	276,15	3498,425	349,8
4	277,15	3848,622	384,9
5	278,15	4236,614	423,7
6	279,15	4667,231	466,7
7	280,15	5146,076	514,6
8	281,15	5679,679	568,0
9	282,15	6275,693	627,6
10	283,15	6949,345	694,9
11	284,15	7702,320	770,2
12	285,15	8551,635	855,2
13	286,15	9512,837	951,3
14	287,15	10604,272	1060,4
15	288,15	11847,379	1184,7

Далее, на основе уже использованных ранее термических градиентов, представлены зависимости температуры от глубины и построены графики зоны стабильности гидратов по выделенным в предыдущих разделах перспективным структурам (рис.17). На всех графиках присутствуют пересечения теоретических и практических линий и наблюдаются достаточно мощные зоны стабильности, из чего можно сделать вывод, что в период последнего ледникового максимума вполне могли формироваться метановые гидраты. Положение

кровли и подошвы зоны для Анисинского и Новосибирского прогибов – 228-900 м, для Восточно-Сибирского прогиба – 235-730 м, для Северо-Чукотского прогиба – 235-730 м, для Южно-Чукотского – 240-625 м, т.е. мощность зоны менялась от 385 до 672 м.

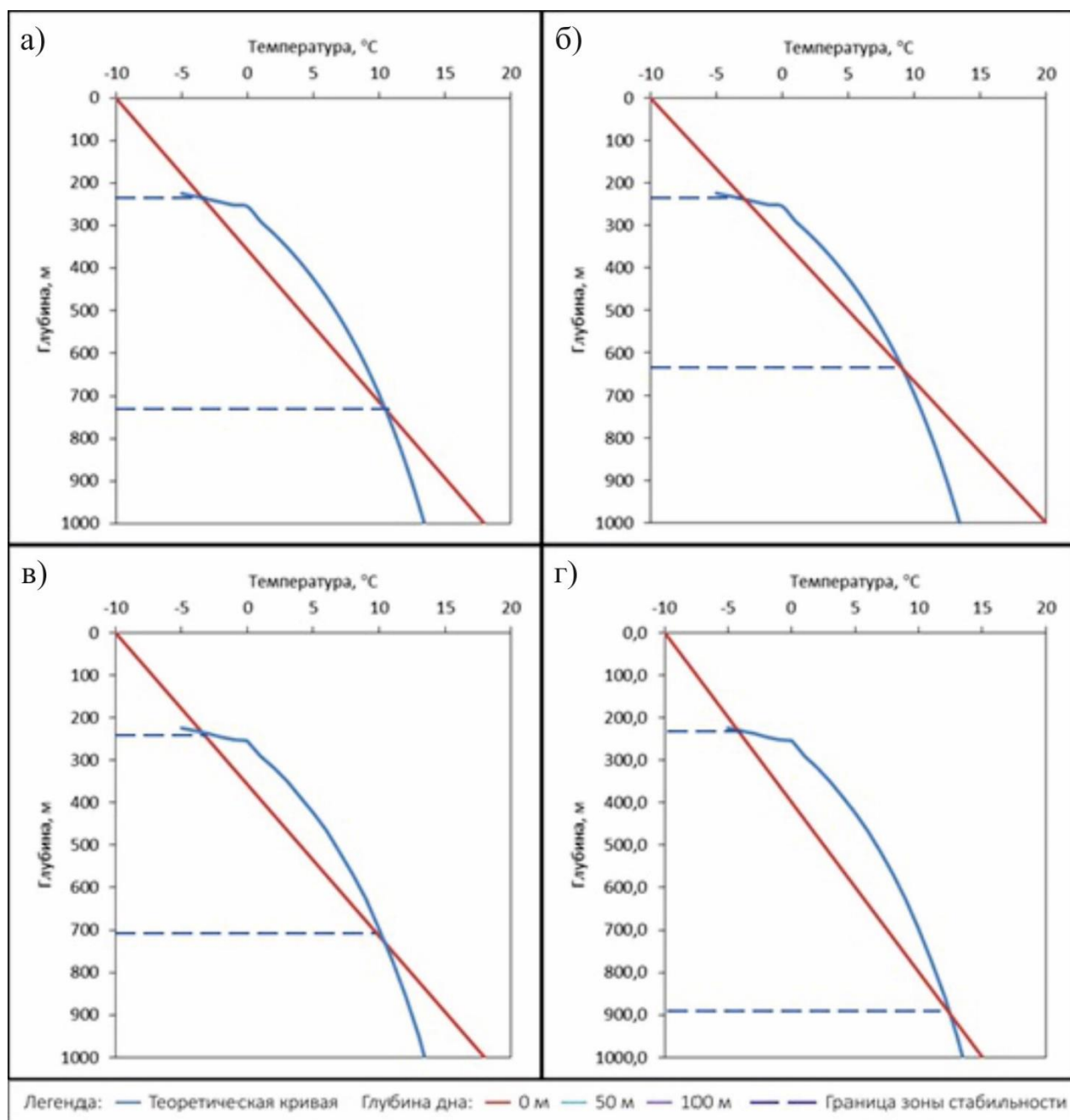


Рисунок 17. Зона стабильности газовых гидратов (100% CH₄) в пределах Восточно-Арктического шельфа во время последнего ледникового максимума

Структуры: а) Северо-Чукотский прогиб; б) Южно-Чукотский прогиб; в) Восточно-Сибирский прогиб; г) Анисинский и Новосибирский прогибы.

В настоящее время, моделирование зоны стабильности гидратов показывает, что в пределах Восточно-Арктического шельфа их формирование и сохранение не представляется возможным. Вследствие чего, можно предположить, что в результате глобального потепления произошло разрушение зоны стабильности, дестабилизация газовых гидратов, а, значит, и эмиссия метана в атмосферу из их скоплений. В частности, это подтверждается данными о, как раз, высоком значении эмиссии метана и более интенсивном росте температуры в арктическом регионе, чем в среднем по миру (Киселев, 2013), что является вполне возможным обоснованием предположения о том, что формирование газовых гидратов на Восточно-Арктическом шельфе невозможно в наше время, но имело место быть 25 тыс. лет назад, и сейчас мы наблюдаем последствия разрушения тех древних скоплений гидратов. Рост температуры в Арктике объясняется тем, что метан занимает важное место в составе атмосферного воздуха и играет значительную роль в, так называемом, «парниковом эффекте», занимая второе место по степени влияния после углекислого газа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все возрастающий интерес к газовым гидратам связан с возможной в будущем перспективой становления источником природного газа благодаря весьма значительным ресурсам, неглубокому залеганию и концентрированному состоянию в них газа. Кроме того, можно свидетельствовать о важной роли процесса разложения газовых гидратов в глобальных природных процессах.

На основе данных, рассчитанных через программы Hydoff и ArcGIS и графиков, построенных в Excel, сделаны выводы о наличии зоны стабильности газовых гидратов в пределах Восточно-Арктического шельфа. Представлены три теоретически возможных варианта в зависимости от содержания метана в гидратах.

Первые два варианта включают условия содержания метана близким к 100% и 95% соответственно. Моделирование зоны стабильности показало, что формирование газовых гидратов невозможно, что, помимо расчетов, косвенно можно подтвердить данными о высоком значении эмиссии метана и более интенсивном росте температуры в арктическом регионе, чем в среднем по миру.

В последнем варианте предполагается содержание метана в гидратах 85% при наличии 15% этана. Для этого случая оконтурены площади зон стабильности, рассчитаны их мощности, объем гидратов и количественное содержание в них метана. Полученные значения являются предполагаемыми, а реальные могут значительно отличаться в зависимости от ряда факторов: коэффициент гидратонасыщения, выход метана на 1 м³ гидратов и др.

Для более точной оценки требуется провести комплекс мероприятий, как, например, бурение опорных скважин, отбор керна, исследование донных отложений, концентраций в них метана, геотермические исследования. Получив информацию о наличии газовых гидратов, составе вмещающих их пород, содержании в гидратах метана и прочие данные, можно будет рассматривать данные ресурсы как стратегический резерв, который обеспечит энергетическую безопасность страны в будущем.

Предположительно значительной добычи газа из газовых гидратов в ближайшее время не будет. Однако, в некоторых развитых странах, обладающих небольшими традиционными энергетическими ресурсами, а также в странах с уникальными местными экономическими условиями, например, расположенностью газогидратных скоплений вблизи скоплений традиционных энергетических ресурсов, газовые гидраты могут стать источником природного газа уже в обозримом будущем. Так, в 2008 году проводилась тестовая добыча газовых гидратов на канадском месторождении Маллик, а в 2013 году – в Японии, которая планирует запустить промышленную добычу в 2018-2019 годах. Совсем недавно, в Китае в

начале мая 2017 году успешно завершился эксперимент по добыче гидратов в Южно-Китайском море, за восемь дней с месторождения на глубине 1200 м от поверхности моря и еще 200 м от поверхности дна было добыто более 120 тыс. м³ газа с содержанием метана до 99,5% (по данным новостного агентства РБК со ссылкой на Геологическую службу Министерства земельных и природных ресурсов Китая). Появление на мировом рынке гидратного газа может значительно изменить общую ситуацию с газовыми потоками в мире.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Андиева Т.А. Тектоническая позиция и основные структуры моря Лаптевых // Нефтегазовая геология. Теория и практика, 2008. т.3 - №1.

Анфилатова Э.А. Аналитический обзор современных зарубежных данных по проблеме распространения газогидратов в акваториях мира // Нефтегазовая геология. Теория и практика, 2008. т.3 - №4.

Богданов Н.А., Филатова Н.И. Строение и геодинамика формирования активных окраин континентов // Тихоокеанская геология, 1998. т.18 - №5.

Виноградов В.А., Гусев Е.А., Лопатин Б.Г. Возраст и структура осадочного чехла Восточно-Арктического шельфа России // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2004. Вып. 5, С. 202-212.

География [Электронный ресурс] - <https://geographyofrussia.com>

Дзюба А.В., Зекцер И.С. Изменения субмаринного подземного стока как возможная причина разрушения морских метаногидратов в Арктике // Водные ресурсы, 2013. т. 40. №1. С. 83-94.

Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М.: 1982.

Драчев С.С., Елистратов А.В., Савостин Л.А. Структура и сейсмостратиграфия шельфа Восточно-Сибирского моря вдоль сейсмического профиля «Индиго-Ильинский залив – остров Жаннетты» // Доклады Академии Наук, 2001. т. 377. №4. С. 521-525/

Друщиц В.А., Садчикова Т.А., Сколотнева Т.С. Гидраты газа на суше и шельфе Арктики и изменение природной среды в квартере // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода, 2011. №71. С. 124-134.

Друщиц, В. А., Садчикова, Т. А., Сколотнева, Т. С. Предпосылки образования и накопления гидратов газа на суше и шельфе Арктики в квартере // Пространство и Время, 2015. №1-2 (19-20). С. 318-326.

Истомин В.А., Чувилин Е.М., Махонина Н.А., Буханов Б.А. Определение температурной зависимости содержания незамерзшей воды в грунтах по потенциалу влаги // Криосфера Земли, 2009. т. XIII. №2 С. 35-43.

- Ихсанов Б.И. Позднемезозойские и кайнозойские деформации осадочных бассейнов акватории Чукотского моря. М.: 2014. С. 116.
- Киселев А.А., Решетников А.И. Метан в Российской Арктике: результаты наблюдений и расчетов // Проблема Арктики и Антарктики, 2013. №2 (96) С. 5-15.
- Кузнецов Ф.А., Истомин В.А., Родионова Т.В. Газовые гидраты: исторический экскурс, современное состояние, перспективы исследований // Российский Химический Журнал. (Журнал Российского Химического Общества им. Д.И. Менделеева), 2003. т. XLVII. №3. С. 5-18.
- Леин А.Ю., Савичев А.С., Русанов И.И, Павлова Г.А., Беляев Н.А., Крейн К., Пименов Н.В., Иванов М.В. Биогеохимические процессы в Чукотском море // Литология и полезные ископаемые, 2007. №3. С. 247-266.
- Макогон Ю.Ф. Природные газовые гидраты: распространение, модели образования, ресурсы // Российский Химический Журнал. (Журнал Российского Химического Общества им. Д.И. Менделеева), 2003. т. XLVII. №3. С. 70-79.
- Пискарев А.Л. Модели глубинного строения Арктического шельфа России // Российская Арктика: геологическая история, минерагения, геоэкология. Спб.: ВНИИОкеангеология, 2002. С. 150-161.
- «Роснефть» - Шельфовые проекты - <https://www.rosneft.ru/business/Upstream/offshore>
- Сергиенко В.И., Лобковский Л.И., Семилетов И.П., Дударев О.В., Дмитриевский Н.Н., Шахова Н.Е., Романовский Н.Н., Космач Д.А., Никольский Д.Н., Никифоров С.Л., Саломатин А.С., Ананьев Р.А., Росляков А.Г., Салюк А.Н., Карнаух В.В., Черных Д.Б., Тумской В.Е., Юсупов В.И., Куриленко А.В., Чувилин Е.М., Буханов Б.А. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина "Метановой катастрофы": некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // Доклады Академии Наук, 2012. т. 446. №3. С. 330-335.
- Соколов С.Ю., Мазарович А.О. Газогидраты в осадочном чехле пассивных океанических окраин: возможности прогноза по данным спутниковой альтиметрии в Атлантике и Арктике // Литология и полезные ископаемые, 2009. №5. С. 483-492.
- Соловьев В.А. Российский Химический Журнал. (Журнал Российского Химического Общества им. Д.И. Менделеева), 2003. т. XLVII. №3. С. 59-69.

ФГУП "Дальморнефтегеофизика". Атлас нефтяной геологии российского сектора Чукотского моря. Южно-Сахалинск: 2002. С. 160.

Якушев В.С., Перлова Е.В., Махонина Н.А., Чувиллин Е.М., Козлова Е.В. Газовые гидраты в отложениях материков и океанов // Российский Химический Журнал. (Журнал Российского Химического Общества им. Д.И. Менделеева), 2003. т. XLVII. №3. С. 80-90.

Grantz A., Holmes M.L. and Kososki B.A. 1975, Geologic Framework of the Alaskan Continental Terrace in the Chukchi and Beaufort Seas // Canada's Continental Margins and Offshore Petroleum Exploration. Memoir 4. P. 669-700.

Hubbard R.G., Edrich S.P. and Rettley R.P., 1987. Geologic evolution and hydrocarbon habitat of the Arctic Alaska Microplate // Marine and Petroleum Geology. Vol.4. P. 2-34.

Matveeva T., Savvichev A.S., Semenova A., Logvina E., Kolesnik A.N. and Bosin A.A. Source, origin, and spatial distribution of shallow sediment methane in the Chukchi Sea // Oceanography, 2015. Vol.28. №3. P. 202–217.

Shakhova N. et al. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice // Phil. Trans. R. Soc. A, 2015.

Sherwood K.W., eds., As of January 1995. Undiscovered Oil and Gas Resources as of January 1995. Alaska Federal Offshore. U.S. Department of the Interior Minerals Management Service, Alaska OCS Region, 1998.